607
D23f

THE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF ILLINOIS

TECHNISCHE HOCHSCHULE DANZIG

1904

1929

FÜNFUNDZWANZIG · JAHRE
TECHNISCHE · HOCHSCHULE · DANZIG

THE LIBRARY OF THE
JAN 6 1931
UNIVERSITY OF ILLINOIS

Druck und Verlag von A. W. Kafemann G. m. b. H., Danzig
1929

D23f

Vorwort

LIBRARY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY GDAŃSK

Zur Feier ihres fünfundzwanzigjährigen Bestehens will die Technische Hochschule Danzig dies Buch allen ihren Freunden und Förderern überreichen. Was hier geboten werden kann, ist freilich nur ein kleiner Ausschnitt aus dem gesamten Lehr- und Forschungsgebiet unserer Hochschule. Dennoch wird vielleicht schon diese Auswahl den Reichtum an Aufgaben und Möglichkeiten erkennen lassen, der gerade einer Danziger Hochschule gegeben ist. Mögen Buch und Fest dazu verhelfen, alte Freunde zu bewahren und neuen das Schicksal und die Sendung unserer Hochschule zu verdeutlichen.

HARGIS

Daß diese Festschrift erscheinen konnte, verdanken wir der immerbereiten Hilfe unseres jüngst viel zu früh heimgegangenen Ehrenbürgers Dr.-Ing. E. h. Gustav Fuchs, der noch bis in die letzten Tage seines Lebens die Jubiläumsvorbereitungen mit wärmster Anteilnahme förderte und vor allem in großzügiger Bereitwilligkeit durch den Verlag der Danziger Neuesten Nachrichten die Mittel zur Herstellung dieses Buches zur Verfügung stellte. Auch dem Verlag A. W. Kafemann G. m. b. H. sei an dieser Stelle für sein Entgegenkommen gedankt.

Danzig-Langfuhr, Juli 1929.

Im Auftrage des Senats
der Technischen Hochschule Danzig:

H. Kindermann O. Kloeppel E. Schmidt J. Sommer

756949

Inhalt

Seite

I. Hochschulentwicklung:
Professor Dr. Hermann Stremme, Rektor des Amtsjahres 1928/29:
Die Entwicklung der Technischen Hochschule Danzig von 1904 bis 1929 (11 statistische Tafeln im Anhang) 9

II. Geisteswissenschaften:
Professor Dr. Heinz Kindermann:
Lessings Entdeckung des Menschen 27
Professor Dr. Friedrich Luckwaldt:
Friedrichs des Großen Anschauungen von Staat und Fürstentum 37

III. Mathematik und Physik:
Professor Dr. Eberhard Buchwald:
Über Auswertungsverfahren bei der Brownschen Bewegung 53
Professor Dr. Alfred Kalähne:
Einiges über Tabellen zur Auflösung biquadratischer und kubischer Gleichungen und ihre Anwendung bei Schwingungsproblemen 59
Geh. Reg.-Rat Professor Dr.-Ing. E. h. Dr. phil. Hans Lorenz:
Widerstände der laminaren und turbulenten Strömung 65
Professor Dr. Ernst Pohlhausen:
Zur Berechnung der Gegliederten Druckstäbe 71
Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Friedrich Schilling:
Die geodätischen Linien auf der Pseudosphäre 81
Professor Dr. Julius Sommer:
Über eine Aufgabe der konformen Abbildung 91

IV. Chemie:
Professor Dr.-Ing. Engelhardt Glimm:
Probleme der Jodforschung 103
Professor Dr. Otto Heuser:
Zweck und Ziel der Bodenbearbeitung 109
Professor Dr. Karl Jellinek und Assistent Dipl.-Ing. August Deubel:
Das Reduktionsgleichgewicht des Bleisulfids und die chemischen Konstanten von Schwefel und Schwefelwasserstoff 115
Professor Dr. Hermann Stremme:
Die moderne Bodenaufnahme im Dienste der praktischen Landwirtschaft 129
Professor Dr. jur. et med. Gerhard Wagner:
Versuche über das biologische Prinzip in der Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm 141

Seite

Professor Dr. Hans von Wartenberg:
Herstellung von sauerstofffreiem Stickstoff 153
Geh. Reg.-Rat Prof. Dr.-Ing. E. h. Alfred Wohl und Assistent Dr.-Ing. E. Bernreuther:
Über Derivate des Asparagindialdehyds 159

V. Architektur:
Geh. Reg.-Rat Prof. Albert Carsten:
Das alte bürgerliche Wohnhaus in Danzig und den Niederlanden..... 169
Professor Otto Kloeppel:
Das Indogermanische Haus Europas 177
Professor Dr. Fritz Krischen:
Artilleristisches an griechischen Festungen 193

VI. Bauingenieurwesen:
Professor Karl Hoepfner:
Vom Lehrstuhl für Stadtbauwesen und Straßenbau und der Straßenbauforschungsstelle Ostpreußen 203
Regierungs- und Baurat Prof. Dr.-Ing. Richard Winkel:
Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der Technischen Hochschule Danzig 211

VII. Maschinenbau:
Professor Dr.-Ing. Georg Mangold:
Leistungs- und Zugkraftkurven der Diesellokomotive 221
Professor Dr.-Ing. Ernst Schmidt:
Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln 231

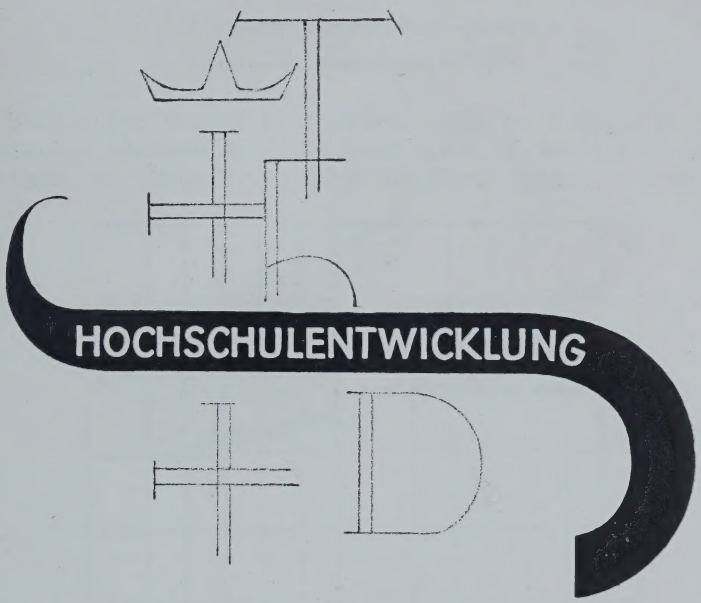
VIII. Elektrotechnik:
Professor Karl Küpfmüller:
Die Grundlagen der elektrischen Sprachübertragung 253

IX. Schiffs- und Flugtechnik:
Professor Dr.-Ing. Rudolf Erbach:
Die Wirtschaftlichkeit von großen Frachtschiffen mit Dampf- oder Dieselmotorantrieb 277
Professor Dr.-Ing. Gustav Flügel:
Ein neues Verfahren zur näherungsweisen Lösung mehrdimensionaler Spannungsprobleme 301
Professor Dr.-Ing. Herbert Wagner:
Verdrehung und Knickung von offenen Profilen 329

*

Die Entwürfe für Umschlag, Titelblatt und Zwischentitel der Festschrift stammen von Professor Fritz Pfuhle.

LIBRARY
UNIVERSITY OF ILLINOIS
URBANA



Die Entwicklung der Technischen Hochschule Danzig von 1904 bis 1929

(mit 11 Zahlenbildern, Tafeln 1 bis 5)

Von Professor Dr. Hermann Stremme
Rektor des Amtsjahres 1928/29

Die deutschen Technischen Hochschulen haben im letzten Vierteljahrhundert einen bedeutsamen Abschnitt ihrer Geschichte erlebt, in dessen Mitte der Weltkrieg steht. Eine Reihe von Jahren hindurch bis zum Kriege betrug die Zahl ihrer Studie-

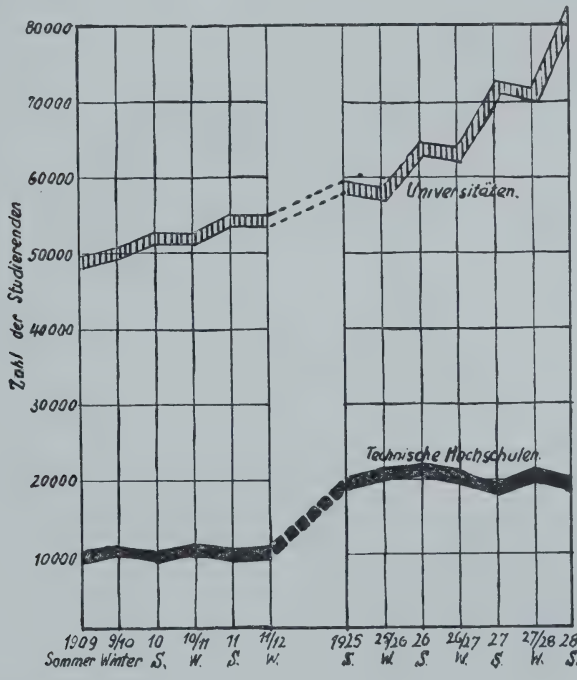


Abb. 1.

Besuch der Technischen Hochschulen und Universitäten vor und nach dem Kriege.

renden etwa 10 000. Sie war hierbei Schwankungen um 10 % ausgesetzt, aber wie die Abbildung 1 (entnommen einer Denkschrift des Vereins Deutscher Ingenieure vom Januar 1929) zeigt, war sie im ganzen beständig. Nach dem Kriege setzte

zunächst ein starker Andrang von Kriegsteilnehmern ein. Nachdem dieser in der Hauptsache sich verloren oder zu Ende studiert hatte, war die Besucherzahl ziemlich beständig um 20 000 herum, hatte sich also bemerkenswerter Weise verdoppelt. Wie die Verhältniszahlen der Abbildung 2 (Denkschr. V.D.I.) verdeutlichen, ist die Verdoppelung im ganzen recht beständig, aber ungleichmäßig, die Sommersemester sind schwächer besucht als die Wintersemester, was vor dem Kriege so ausgesprochen nicht der Fall war.

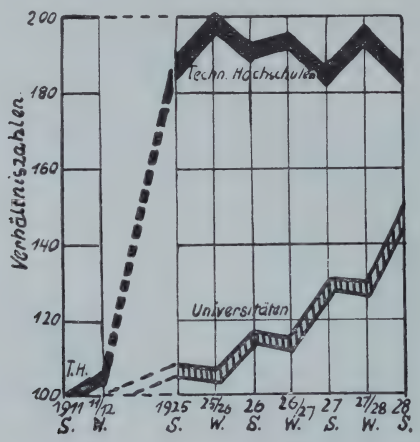


Abb. 2.

Zunahme der Studierenden der Technischen Hochschulen und Universitäten gegen das Sommersemester 1911
(Verhältniszahlen: Sommersemester 1911 = 100 gesetzt.)

Die Verdoppelung der Besucherzahl ist nicht in allen Fachrichtungen anzutreffen, sondern nach Abbildung 3 (entnommen einer Arbeit von H. Sikorski in „Studentenwerk" III 1929, 1. S. 32) sind manche Fachrichtungen wie Maschinenbau, Chemie und Hüttenkunde, Elektrotechnik, Allgemeine Wissenschaften daran in verschiedenem Grade beteiligt, während sogar Architektur und Bauingenieurwesen abgenommen haben. Die verhältnismäßige Zu- und Abnahme geht aus der Abbildung 4 (Denkschr. V.D.I.) hervor, wonach die verhältnismäßig stärkste Zunahme bei den Elektrotechnikern, dann bei den Allgemeinen Wissenschaften stattgefunden hat, während der Schiffbau die stärkste Abnahme zu verzeichnen hat.

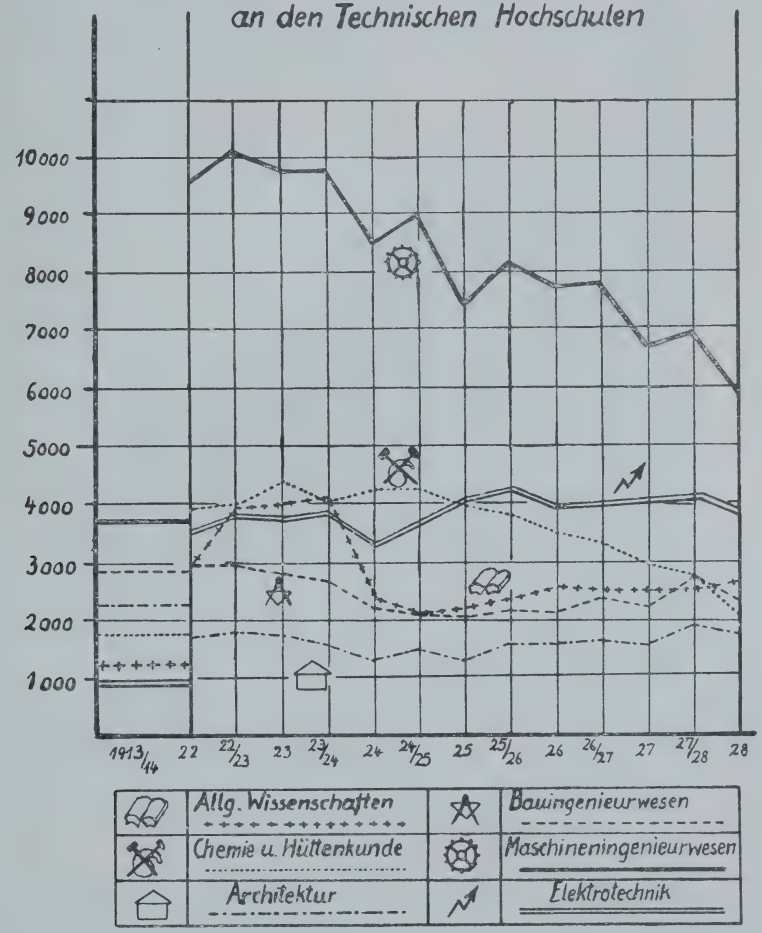
Auch nicht allen Hochschulen ist die Verdoppelung zugutegekommen, sondern nach Abbildung 5 (Denkschr. V.D.I., ergänzt durch Danzig) haben einzelne keine erfahren, andere wesentlich stärker zugenommen.

Unsere Danziger Hochschule ist in den übernommenen Statistiken nicht enthalten. Bei uns war und ist die Wirkung des Krieges durch die Abtrennung Danzigs vom Deutschen Reiche äußerlich weit stärker zu verspüren als bei den reichsdeutschen. Es fragt sich nun, welche Entwicklung wir unter diesen schweren Ereig-

nissen genommen haben. Die Zahlen unserer Tabellen sind auf Grund des amtlichen Materials durch E. Paulisch in dem mir unterstellten Institut zu den Kurven verarbeitet worden.

Abb. 3.

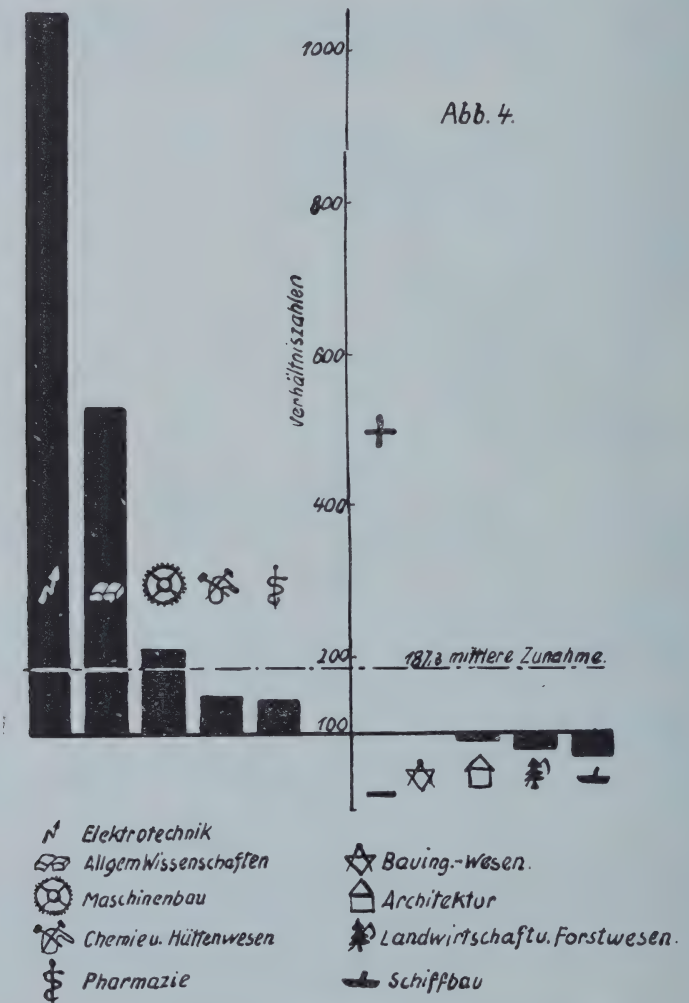
Studentenzahl in den einzelnen Studienfächern an den Technischen Hochschulen



Zahlenbild 1: Besucherzahlen.

Die Gesamtzahl der ortsanwesenden Studierenden unserer Hochschule gibt ein ähnliches Bild, wie es das sämtlicher deutscher Hochschulen ist. Vom Wintersemester 1908/09 an war dauernd die Zahl 600 überschritten. In den drei letzten Semestern kam sie nahe an 700. Nach dem Kriege der starke, wenn auch viel langsamer und später einsetzende Aufstieg bis zu mehr als 1650 im Wintersemester 1922/23, dann bis Sommersemester 1924 ein Rückgang auf weniger als 1350

und von da wieder ein Aufstieg auf fast 1650 im Wintersemester 1928/29. Die Zahl ist demnach mehr als verdoppelt. Wir haben zu der Abbildung 5 der V.D.I.-Denkschrift das Verhältnis der Danziger Studierenden in dem Sommersemester 1911 (100)



Vergleich der Zahl der Studierende.. im Sommersemester 1928 mit der im Sommersemester 1911 nach Fachrichtungen
(Verhältniszahlen; Sommersemester 1911 100 gesetzt.)

und 1928 (243) angegeben und können feststellen, daß die Vergrößerung der Besucherzahl die aller reichsdeutschen Hochschulen übertrifft. Außer den ortsanwesenden Studierenden ist seit dem Kriege eine wachsende Zahl von beurlaubten an-

gegeben, eine Kategorie, die vor dem Kriege nicht ausgeschieden wurde, weil sie praktisch infolge zu geringer Zahlen nicht existierte. Die Ursache der Beurlaubung sind Krankheit und praktische Arbeit. Bemerkenswert ist der Abfall der Besucherzahl in den Sommersemestern nach dem Kriege, die vor dem Kriege nicht bestand. Auch dies stimmt mit den Reichszahlen überein. Die Ursache ist wieder in der Hauptsache die praktische Arbeit. Die V.D.I.-Denkschrift bemerkt: „Die Spitzen rühren daher, daß der größte Teil der Studierenden im Wintersemester mit dem Studium beginnt."

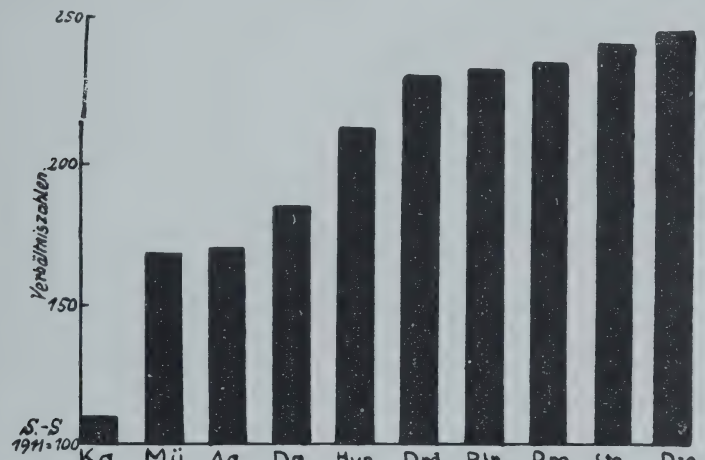


Abb. 5.

Zunahme des Besuches der Technischen Hochschulen im Sommersemester 1928 gegenüber Sommersemester 1911

(Verhältniszahlen; Sommersemester 1911 = 100)

Ka. = Karlsruhe	Da. = Darmstadt	Bln. = Berlin
Mü. = München	Hvr. = Hannover	Brg. = Braunschweig
Aa. = Aachen	Drd. = Dresden	Stg = Stuttgart
		Dzg. = Danzig.

Die Technische Hochschule Breslau fehlt in dieser Aufstellung weil sie 1911 erst im Aufbau begriffen war.

Ganz anders ist die Bewegung der Hörerzahlen. Vor dem Kriege zwischen 50 und 100. Von 1925 ab wird nur noch zweimal 50 ein wenig überschritten, sie halten sich um $^1/_3$ Hundert!

Ebenfalls sehr vermindert haben sich die Gastteilnehmer, die vor dem Kriege in den Sommersemestern zwischen 76 und 220, in den Wintersemestern zwischen 353 und 731 betrugen, ein Zeichen, daß die Hochschule eine bedeutende Zugkraft auf das Danziger bildungsfreudige Publikum ausübte. Nach dem Kriege ist der Unterschied zwischen Sommer- und Wintersemester zum Teil verwischt, die Gesamtzahl erreicht nur im letzten Wintersemester mehr als 200.

Zahlenbild 1a: Die Studentinnen.

Die Zahl der Frauen unter den Vollstudierenden in den drei Semestern vor dem Kriege betrug 10, was 1,5 % der Gesamtzahl gleichkam. Nach dem Kriege nahm sie unter Schwankungen bis auf 44 zu, was 2,7 bis 2,9 % der Gesamtzahl entspricht. Das Frauenstudium hält sich also an unserer Hochschule in bescheidenen Grenzen. Manche Abteilungen, wie die Bauingenieure, die Maschinenbauer, die Schiffbauer haben überhaupt noch keine studierende Frau gehabt. Ihre Mehrzahl befindet sich in den Abteilungen für Geisteswissenschaften und für Chemie.

Zahlenbild 1b: Das Verhältnis der Nationalitäten.

Die Gliederung nach Nationalitäten muß in Danzig infolge der Abtrennung vom Deutschen Reiche anders vorgenommen werden als an den reichsdeutschen Hochschulen. Hier wird in erster Linie die Staatszugehörigkeit angegeben. Diese darzustellen würde für uns zu kompliziert sein. Daher haben wir die Volkszugehörigkeit, die Nationalität, zur Grundlage der Statistik machen müssen. Als „Deutsche" gelten für die Vorkriegszeit alle reichsdeutschen, als „Andere" alle nicht im Deutschen Reiche beheimateten Studierenden. Auch die Reichsdeutschen fremder Nationalität sind somit bei den „Deutschen" der Vorkriegszeit angegeben, während z. B. die Deutschösterreicher als „Ausländer" nicht darunter fallen. Alle diese „Anderen" oder „Ausländer" betrugen vor dem Kriege etwa 5 % der Gesamtzahl.

Von 1920 ab haben wir unterschieden „Deutsche", „Danziger" und „Andere". Unter den „Deutschen" sind diesmal Volksdeutsche, also Reichsdeutsche, Deutschösterreicher, Sudetendeutsche, Siebenbürger, Deutschbalten usw. zusammengefaßt, gleichgültig welches ihre Staatsangehörigkeit ist. Maßgebend ist die Zugehörigkeit zur Deutschen Studentenschaft, der der Nachweis der Volkszugehörigkeit erbracht sein muß. Die „Danziger", die ebenfalls zur Deutschen Studentenschaft gehören, sind besonders ausgeschieden, um den Anteil unseres kleinen Ländchens an der Gesamtzahl der Studierenden festzustellen. Er schwankt zwischen 12 und 20 %, meist näher an 12, der absoluten Zahl nach zwischen 170 und 350, meist um 200 herum. Außerdem studieren noch etwa doppelt soviele Danziger an den verschiedenen Hochschularten im Deutschen Reich [1]). Insgesamt kann man mit 650 studierenden Danzigern rechnen, das ist etwa 0,17 % der Bevölkerung.

Die „Anderen" fassen alle nichtdeutschen Ausländer zusammen. In den Inflationsjahren 1922 und 1923 betrugen sie mehr als 700, das waren etwa 40 % aller Studierenden. Von da ab ist ihre Zahl beständig gesunken und beträgt jetzt weniger als 400, das sind etwa 23 %. Der Mehrzahl nach sind sie polnischer Staatszugehörigkeit, und zwar zu 85 % (fast 20 % der Gesamtzahl der Studierenden). Von diesen sind gegenwärtig etwa zwei Drittel polnischer, ein Drittel jüdischer und ukrainischer Nationalität. Die übrigen Länder wechseln beständig. Es sind gegenwärtig 11 europäische, 2 asiatische, 1 amerikanischer Staat vertreten.

Zahlenbild 1c: Vergleich der Hochschulen Hannover, Danzig, Stuttgart [2]).

Nach der deutschen Hochschulstatistik für das Sommerhalbjahr 1928 haben die Hochschulen Breslau, Braunschweig, Aachen, Karlsruhe weniger als 1200 Studie-

rende, zwischen 1500 und 2000 Stuttgart und Hannover, zwischen 2000 und 2500 Darmstadt und Dresden, etwa 4000 und mehr München und Berlin. Danzig ist also gegenwärtig nahe an Stuttgart und Hannover. Mit Stuttgart war Danzig auch vor dem Kriege ziemlich gleich, dagegen hatte Hannover etwa die Hälfte mehr.

Das Zahlenbild zeigt nun eine wesentlich andere Entwicklung der drei Hochschulen von 1920 ab. Hannover hatte damals fast 3000, dreimal so viel als Danzig, Stuttgart fast 2000. Das heißt: Danzig hatte wesentlich weniger an Kriegsteilnehmern als die beiden anderen Hochschulen. In den Hauptjahren der Inflation 1922/3 erfuhren Danzig und Stuttgart einen starken Zuwachs, Danzig verhältnismäßig stärker als Stuttgart infolge des starken Zudranges der Ausländer. Zum Sommersemester 1924 hatten alle drei Hochschulen einen starken Abfall, von dem sie sich wieder etwas erholten. Aber während nun Danzig zunächst einen Stillstand hatte und vom Sommersemester 1927 an wieder zunahm, sind die beiden anderen Hochschulen in dauerndem Rückgang begriffen. (Der Vergleich der einzelnen Abteilungen wird bei Zahlenbild 2 mitbesprochen.)

Zahlenbild 2: Verteilung der Studierenden und Hörer auf die Abteilungen.

An den starken Veränderungen der Besucherzahl sind die einzelnen Abteilungen sehr verschieden beteiligt. Im Vergleich zur Abbildung 3 fällt bei der Vorkriegsentwicklung auf, daß in Danzig die Reihenfolge der Abteilung im Stärkeverhältnis anders war als im Gesamtdurchschnitt. Im Wintersemester 1913/14 war sie in aufsteigender Reihenfolge:

im Gesamtdurchschnitt: Elektrotechnik, Allgemeine Wissenschaften, Chemie, Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,

in Danzig: Elektrotechnik, Allgemeine Wissenschaften, Chemie, Schiffbau, Architektur, Maschinenbau, Bauingenieurwesen.

Die Abteilung für Bauingenieurwesen war im Gegensatz zum Reichsdurchschnitt in Danzig am stärksten, und zwar im Durchschnitt doppelt so stark als die nächststärkste, welches abwechselnd die Abteilung für Schiffbau, dann lange Zeit die für Architektur und erst zum Schluß die für Maschinenbau war. Nach dem Kriege wurde die Reihenfolge:

im Gesamtdurchschnitt: Architektur, Bauingenieurwesen, Allgemeine Wissenschaften, Chemie, Elektrotechnik, Maschinenbau,

in Danzig: Geisteswissenschaften, Mathematik und Physik, Architektur, Chemie, Schiffbau, Bauingenieurwesen, Elektrotechnik, Maschinenbau.

Wenn man in Danzig die Geisteswissenschaften und Mathematik und Physik als Allgemeine Wissenschaften zusammenfaßt, so wird die Reihenfolge der des Gesamtdurchschnittes ähnlicher mit Ausnahme des Bauingenieurwesens, das in Danzig nicht den gleichen starken Abstieg erlebt hat, wie im Reichsdurchschnitt, sondern sich wenigstens seit 1922 im ganzen auf der alten Linie bewegt hat. Die Abteilung für Geisteswissenschaften nimmt seit 1927 infolge stärkerer Betonung der sprachlichen Fächer einen unverkennbaren Aufschwung, während der der Abteilung für Mathe-

matik und Physik infolge Einführung des Studiums der technischen Physik und der Lehrerausbildung auf einer beachtlichen Höhe zum Stillstand gelangt zu sein scheint.

Die Abteilung für Chemie, der Hüttenkunde und Pharmazie fehlen, hat den Abstieg, der 1924/25 im Reichsdurchschnitt einsetzt und seitdem gleichmäßig angehalten hat, in der Zeit von 1922/23 bis 1924 gehabt. Seitdem steigt sie infolge Aufnahme der Landwirtschaft dauernd wieder an und hat jetzt ihre frühere Höchstzahl aus der Inflationszeit bereits überschritten. Bei der Abteilung für Schiffbau macht sich die Aufnahme des Flugzeugbaues seit 1926 bemerkbar. Die Abteilung für Elektrotechnik hat sich im Reiche mit Ausnahme des auch in Danzig bemerkbaren Krisensemesters 1924 gleichmäßiger entwickelt und gehalten, während in Danzig seit 1926 ein Abstieg zu bemerken ist. Der Maschinenbau hat im Reiche und in Danzig einen Höhepunkt 1922/23, geht seitdem dort dauernd, hier mit Unterbrechung durch das Wintersemester 1924/25, das die Danziger Höchstzahl brachte, zurück. Der Rückgang beträgt im Reich 40 %, in Danzig 20 %.

Vergleicht man noch die Bewegung der Abteilungen in Hannover, Danzig, Stuttgart miteinander, so steht in der Entwicklung der Allgemeinen Wissenschaften Danzig zwischen Hannover und Stuttgart, welch letztere Hochschule die höchste Zahl hat. Die Chemie ist in Danzig dauernd schwächer gewesen als an den beiden anderen, da die Laboratorien kleiner sind und von ihrer Platzzahl die Zahl der Studierenden abhängt, Stuttgart außerdem auch die Pharmazie und etwas Hüttenkunde hat. Der starke Rückgang von 300 auf 120 Studierende in Hannover, also um 60 %, ist in Danzig nicht vorhanden gewesen, sondern zunächst nur von 140 bis 91, also um 35 %, von da der Anstieg durch Aufnahme der Landwirtschaft, neben der aber die Chemie selbst sich gehalten hat, so daß Hannover und Danzig gegenwärtig etwa gleich viele Chemiker haben. Dagegen hat jetzt Stuttgart soviele wie die beiden anderen zusammen, hatte aber auch früher schon mehr als selbst Hannover.

Die Architektur ist in Hannover und Danzig gleichmäßig besucht, nachdem zunächst dort mehr Kriegsteilnehmer waren. Stuttgart hat, namentlich gegenwärtig, soviele Architekturstudierende, wie die beiden anderen zusammen.

Im Bauingenieurwesen ist nach Abgang der Kriegsteilnehmer Stuttgart etwas schlechter, Hannover etwas besser als Danzig.

Im Maschinenbau steht Danzig dauernd hinter Stuttgart, dieses in gleicher Stufe hinter Hannover zurück. In der Elektrotechnik sind Danzig und Stuttgart ziemlich gleich, Hannover um ein Drittel besser. Der Schiffbau ist nur in Danzig vertreten und gleicht mit seinen gegenwärtig über 200 Studierenden die geringeren Zahlen in einigen anderen Abteilungen aus.

Zahlenbilder 3a, 3b: Zahlen der Diplom-Vor- und Hauptprüfungen und der Doktorpromotionen (ohne Ehrenpromotionen).

Die bisher angegebenen Arten der Statistik werden außerordentlich häufig zitiert, um vor dem weiteren Zudrang zum Studium zu warnen. Um sie aber richtig zu bewerten, darf man den Erfolg des Studiums nicht vergessen. Ein solcher drückt sich in der Zahl der Prüfungen aus.

Die Kurven der Tafeln 3a und 3b zeigen die Zahlen der Prüfungen in den einzelnen Abteilungen und Semestern. Für die Vor- und Hauptprüfungen ist eine gewisse Ähnlichkeit mit der Besucherzahl der einzelnen Abteilungen unverkennbar, nur daß die Allgemeinen Wissenschaften erst nach der Einführung des Diplomexamens für technische Physiker seit 1924 in die Erscheinung treten. Die Maschinenbauer und Elektrotechniker lassen sich erst nach Zerlegung der Gesamtabteilung in zwei getrennten Reihen seit 1922 für die Hauptprüfung angeben.

Die Doktorpromotionen zeigen diese Ähnlichkeit nicht, sondern hier steht die Abteilung für Chemie weit vor allen anderen.

Insgesamt waren bis Winterhalbjahr 1928/29 2524 Vorprüfungen, 1916 Hauptprüfungen abgelegt, 255 Doktorpromotionen vollzogen worden. Sie verteilen sich auf die Abteilungen wie folgt:

	Geisteswissenschaften	Mathematik, Physik	Chemie	Architektur	Bauingenieurwesen	Maschinenbau[3]) und Elektrotechnik	Schiffs- und Flugtechnik
Vorprüfungen . .	—	30	233	358	640	937	326
Hauptprüfungen	1	7	200	350	564	644	210
Doktorpromotion.	4	6	105	29	38	54	19

Die Zahlen geben sehr bemerkenswerten Aufschluß über die Beständigkeit der Studierenden in den einzelnen Abteilungen. In der Abteilung für Architektur haben fast alle Studierenden (98 %), die die Vorprüfung bestanden haben, auch die Hauptprüfung abgelegt. Dann folgen Bauingenieurwesen 88 %, Chemie 86 %, Maschinenbau und Elektrotechnik 69 %, Schiffbau 64 %, Mathematik und Physik 23 %. Das Verhältnis der Doktorpromotionen zu den Hauptprüfungen ergibt die Reihenfolge: Mathematik und Physik 86 %, Chemie 53 %, Schiffbau 9 %, Architektur 8,3 %, Bauingenieurwesen 6,7 %, Maschinenbau und Elektrotechnik 6,6 %.

Legt man dem Vergleiche die Zahl der Einzelstudierenden insgesamt und in den einzelnen Abteilungen zugrunde, so ergibt sich die folgende Tabelle, gültig für die Zeit von 1904 bis zum Ende des Wintersemesters 1927/28:

	Allgemeine Wissenschaften[4]) (Geistesw. und Mathem. u. Phys.)	Chemie	Architektur[5])	Bauingenieurwesen	Maschinenbau und Elektrotechnik	Schiffbau
Gesamtzahl . . .	1147	577	821	1350	2621	758
Vorprüfungen . .	—	38	42	46	33,3	41,5
Hauptprüfungen .	—	30,5	39,5	39,5	20,8	25
Doktorpromotion.	—	17	3,4	3,4	2,2	2,5

Die Gesamtzahl der Einzelstudierenden betrug bis dahin 7272. Von diesen haben 33,3 % die Vorprüfung, 24,5 % die Hauptprüfung abgelegt; 3,3 % sind zum Doktoringenieur promoviert worden. Man wird nicht fehlgehen, wenn man diese

Zahlen für niedrig hält. Würden sie dem Durchschnitt an allen Hochschulen entsprechen (worüber kein Material vorliegt), so würden die so häufigen Warnungen vor dem Studium und die Forderungen, die Zahl der Studierenden künstlich zurückzudrücken, fehlgehen. Der Verlauf des Studiums reguliert die Auswahl der Geeigneten von selbst. Jedenfalls hat die Danziger Hochschule ihre Prüfungen seit jeher ernst aufgefaßt.

Die Summe der Besucherzahlen an Vollstudierenden ohne die beurlaubten, die Hörer und die Gastteilnehmer für die Zeit vom Wintersemester 1904/05 bis Ende des Wintersemesters 1927/28 beträgt 35 475 (bis Ende Wintersemester 1928/29 38 604). Diese Zahl, mit der der Einzelstudierenden verglichen, ergibt, daß der Student durchschnittlich 4,9 Semester in Danzig zu bleiben pflegt. Nach dem Reichsdurchschnitt für das Sommersemester 1928 [1]) bleiben rund 20 % der Studierenden länger als 8 Semester an den Hochschulen, eine Zahl, die auch für Danzig zutreffen dürfte.

Zahlenbild 4: Stärke und Zusammensetzung des Lehrkörpers.
4a: Anzahl der Assistentenstellen.
4b: Anzahl der Vorlesungen und Übungen.

Die Hochschule begann im Wintersemester 1904/05 mit 28 ordentlichen Professuren, einem ordentlichen Honorarprofessor, 12 Dozenten (Lehraufträgen an nicht beamtete Mitglieder des Lehrkörpers) und 4 Lektoraten, also mit einem Lehrkörper von 45 Mitgliedern. Der erste Privatdozent kam im Studienjahr 1906/07 hinzu. Im letzten Studienjahr 1913/14 vor dem Kriege waren 30 ordentliche Professuren, 1 ordentlicher Honorarprofessor, 15 Dozenturen, 11 Privatdozenten, 4 Lektorate, 1 anderer Lehrauftrag vorhanden, also ein Lehrkörper von 62 Mitgliedern, während das Studienjahr 1912/13 bereits 65 Mitglieder gehabt hatte. Diese verhältnismäßig einfache Zusammensetzung des Lehrkörpers blieb bis 1919/20 bestehen, wobei allmählich die Zahl der Ordinariate auf 32 angewachsen, die Zahl der Privatdozenten auf 8, die Gesamtzahl auf 61 gefallen war.

1920/21 traten außerordentliche Honorarprofessoren hinzu, 1921/22 wurden die hauptamtlichen Dozenturen in planmäßige außerordentliche Professuren umgewandelt, 1924/25 wurde der erste außerplanmäßige außerordentliche Professor (früher waren nicht besonders gezählte Titularprofessoren vorhanden), 1925/26 die ersten persönlichen Ordinarien aus der Zahl der planmäßigen außerordentlichen Professoren aufgeführt (die Ernennung geschah jeweils im vorhergehenden Studienjahr). 1926/27, also nach 21jährigem Bestehen der Hochschule, waren die ersten Emeriti unter den Ordinarien angegeben. Insgesamt wuchs der Lehrkörper mit dieser immer komplizierter werdenden Zusammensetzung auf 75 Mitglieder einschließlich und 73 ausschließlich der Emeriti.

Vergleicht man die Zahlen der Mitglieder des Lehrkörpers für die Studienjahre 1904/05, 1913/14, 1926/27, 1928/29 mit der der ordentlichen Studierenden (ohne beurlaubte, Hörer und Gastteilnehmer), so kommen auf jedes Mitglied des Lehrkörpers in den genannten Jahren

6 bzw. 11 bzw. 24 bzw. 22 Studierende.

Die oben zitierte Denkschrift des Vereins Deutscher Ingenieure gibt als Durchschnittszahlen für die Technischen Hochschulen des Deutsches Reiches an, daß in den Jahren 1910/11, 1923/24 und 1926/27 auf einen ordentlichen und außerordentlichen Professor 27,6 bzw. 45,8 bzw. 34,7 Studenten und Hörer entfielen und bemerkt dazu: „Die Technischen Hochschulen sind dem Bedarf an Lehrkräften nachgekommen." Berechnet man die entsprechenden Zahlen für Danzig, so erhält man: 23 bzw. 36 bzw. 37 Studierende (ohne die Beurlaubten) und Hörer kamen 1910/11, 1923/24 und 1926/27 auf je einen ordentlichen und außerordentlichen Professor; also in den beiden erstgenannten Jahren stand Danzig etwas günstiger, im letzten etwas ungünstiger. Doch scheint mir die oben wiedergegebene Statistik, bezogen auf den ganzen Lehrkörper, die wirkliche Lehrzahl der Hochschule zutreffender zu erfassen.

In ähnlicher Weise läßt sich für das Wintersemester 1927/28 das Verhältnis der Mitglieder des Lehrkörpers zu den Studierenden an den Technischen Hochschulen des Deutschen Reiches nach dem Statistischen Jahrbuch für das Deutsche Reich 1928 (S. 513) angeben. Es hatten:

	Aachen	Berlin	Braunschweig	Breslau	Darmstadt	Dresden
Studierende	1047	4717	877	750	2363	2401
Mitglieder des Lehrkörpers .	102	304	83	70	118	132
Auf 1 Mitglied des Lehrkörpers entfallen Studierende . .	10	16	11	11	20	18

	Hannover	Karlsruhe	München	Stuttgart	Danzig
Studierende	1934	1236	4190	1840	1584 / S.S. 27 1529 } 1556
Mitglieder des Lehrkörpers .	80	108	142	103	68
Auf 1 Mitglied des Lehrkörpers entfallen Studierende . .	24	11	29	18	23

Danach hatte die Mehrzahl der Technischen Hochschulen im Wintersemester 1927/28 günstigere Lehrzahlen als die Danziger (23) im Studienjahre 1927 28 (Wintersemester 1927/28 und Sommersemester 1928), ungünstigere nur Hannover und München.

Das Wachstum der Assistenten und Assistentenstellen (Zahlenbild 4 a) hat sich nicht unerheblich anders vollzogen als das des Lehrkörpers. Die Assistenten sind in der Hauptsache den ordentlichen und zum Teil den planmäßigen außerordentlichen Professoren beigegeben. Aber auch mit deren Anwachsen bestehen nur geringe Übereinstimmungen.

Bis zu den Inflationsjahren, in denen zuerst ein stärkeres Anwachsen der Zahl der Studierenden stattfand, waren allgemein die Zahlen der Assistentenstellen mit denen der Assistenten gleich. Später wurden manche Stellen geteilt, erst im Studienjahr 1928/29 trat eine neue grundsätzliche Reglung durch Umwandlung der

geteilten Stellen in je zwei neue ein, daher das plötzliche Anwachsen von 1927/28 bis 1928/29 um 12 Stellen, wodurch in Wirklichkeit nur bestehende Zustände legalisiert wurden. Im Wintersemester 1928/29 kamen auf je eine Assistentenstelle 21 Studierende (ohne beurlaubte) bzw. 22 Studierende und Hörer. Die Denkschrift des Vereins Deutscher Ingenieure gibt für 1926/27 als Reichsdurchschnitt 20,2 an und bezeichnet diese Zahl als genügend. Danach wird die jetzige in Danzig als etwa gleichartig angesehen werden können.

Die Zahl der Prüfungen wurde oben als ein Maßstab für den Lehrerfolg bezeichnet. Diesen kann man nicht mit den Zahlen des Lehrkörpers vergleichen, sondern nur mit denen der Studierenden. Dagegen bietet die Zahl der Vorlesungen und Übungen [6]) einen Maßstab für die Art der Lehrtätigkeit. Die Jahre 1904/05 bis 1910/11 kann man als die Entwicklungsjahre betrachten. Von da ab bis 1920/21 war die Zahl der Vorlesungen und Übungen zwischen 260 und 270; das sind etwa 4,3 je Mitglied des Lehrkörpers. Von da ab beginnt mit dem Zustrom der Studierenden eine neue Entwicklung, die in ihrem Ausmaße und ihren Einzelstufen der anfänglichen nicht unähnlich ist. Sie hat im Studienjahr 1928/29 die Zahl 435 erreicht, dürfte aber noch nicht abgeschlossen sein. Bei 73 Mitgliedern des Lehrkörpers kommen auf jedes Mitglied 6 Vorlesungen und Übungen.

Vergleicht man die Zahlen mit denen der Studierenden und Hörer, so kommen in den Jahren 1911—1914 auf jede Vorlesung und Übung 2,7 Studierende und Hörer, im Jahre 1928/29 3,9, auf das Halbjahr und die halbe Vorlesungs-Übungszahl umgerechnet 11 bzw. 16.

Die Vermehrung der Vorlesungen und Übungen ist nicht in allen Teilen gleichmäßig erfolgt. Vergleicht man die Studienjahre 1911/12 und 1928/29 miteinander, so haben die einzelnen Abteilungen den folgenden Entwicklungsgang genommen:

	Allgemeine Wissenschaft.	Chemie	Architektur	Bauingenieurwesen	Maschinenbau u. Elektrotechn.	Schiffbau
Vermehrung auf	176 %	210 %	105 %	147 %	185 %	137 %

Zahlenbild 5: Einnahmen, Staatszuschüsse und Ausgaben.

Haben die bisherigen Zahlenbilder die Entwicklung der Studentenschaft, des Lehrerfolges, des Lehrkörpers und der Lehrtätigkeit gezeigt, so soll die letzte Tafel eine Übersicht über die Mittel geben, die zum Unterhalt der Hochschule nötig waren. Die Vorkriegszeit hatte eine verhältnismäßig große Stetigkeit in der Entwicklung des Haushalts gehabt. Von 1909 bis zum Kriegsbeginn blieben die Ausgaben ziemlich gleichmäßig bei 750 000 M. Durchschnittlich waren in dieser Zeit 650 Studierende (ohne Hörer und Gastteilnehmer) vorhanden, so daß durchschnittlich etwa 1150 M. für jeden Studierenden ausgegeben wurden. Von der Gesamtsumme waren 130 000 Einnahmen, 620 000 Staatszuschüsse. Diese letzteren betrugen somit 950 M. je Studierender, die Einnahme 200 M.

Nach der Inflationszeit ist es nur vorübergehend für 1926 und 1927 zu einer entsprechenden Stetigkeit gekommen. Die Gesamtausgaben betrugen 2,3 Millionen

Gulden = etwa 1,84 Millionen Reichsmark. Davon waren etwa 1,5 Millionen Gulden = etwa 1,25 Millionen RM Staatszuschuß und etwa 800 000 Gulden = etwa 640 000 RM Einnahmen. Die Einnahmen hatten also die Höhe des früheren Staatszuschusses überschritten und waren etwa fünfmal so hoch wie die früheren Einnahmen. Dagegen war der Staatszuschuß gerade verdoppelt. Die Durchschnittszahl der Studierenden (ohne beurlaubte, Hörer und Gastteilnehmer) betrug in diesen Jahren 1540. Die Ausgaben waren also noch nicht 1200 RM je Studierenden, die Einnahmen etwa 420 RM, der Staatszuschuß etwa 780 RM. Die Einnahmen waren also prozentual gegenüber der Vorkriegszeit sehr hoch geschraubt und der Staatszuschuß beträchtlich heruntergesetzt worden. Im Jahre 1925 hatte dieser bereits einmal über 2 Millionen Gulden betragen, war dann aber infolge Verschlechterung der Finanzlage Danzigs wieder erheblich herabgesetzt worden.

Schon im Jahre 1928 wurden die Einnahmen noch einmal erheblich gesteigert und für 1929 auch der Staatszuschuß, ohne daß dieser letztere wieder den des Jahres 1925 erreicht hätte. Doch wird, in Gulden gerechnet, voraussichtlich wieder der gleiche Betrag an Staatszuschuß je Studierender zur Verfügung stehen wie vor dem Kriege in Mark.

Kein Zweifel, daß sie noch zu niedrig ist. Aber es darf nicht übersehen werden, daß jetzt die Hochschule von der kleinen Freien Stadt mit nur 380 000 Seelen unterhalten wird, während früher Preußen dahinterstand. Auf den Kopf der Bevölkerung gerechnet betrug der Zuschuß 1926—1928 etwa 4 Gulden = 3,20 RM, 1929 wird er etwa 5 Gulden = 4 RM betragen, eine hohe Belastung für die kleine Freie Stadt.

Im Deutschen Reiche betragen die Lasten, die die einzelnen Staaten für ihre Hochschulen (aller Arten) gegenwärtig aufbringen, nach einer Mitteilung von Geh. Reg.-Rat Professor Dr. Brandi auf dem 6. Hochschultage in München (März 1929), in Preußen 2,78 RM, in Braunschweig 3,06 RM, in Thüringen 3,70 RM, in Bayern 3,88 RM, in Sachsen 4,09 RM, in Baden 5,57 RM, in Hessen 5,83 RM, in Mecklenburg-Schwerin 6,73 RM. Danach steht Danzig etwa Bayern und Sachsen gleich und doch noch wesentlich näher an Preußen als an Baden, Hessen und Mecklenburg.

Die vorstehende Übersicht zeigt ein erfreuliches Leben der Technischen Hochschule Danzig auch in der Gegenwart. Nach den Kurven der deutschen Hochschulstatistik für das Sommersemester 1928 geht an den meisten Technischen Hochschulen die Besucherzahl zurück. Wir gehören zu den wenigen, die seit einigen Jahren stetig zunehmen, und zwar an deutschen Studierenden, während die Nichtdeutschen zurückgehen.

Kurz zusammengefaßt sind die Ergebnisse:

1. Die Zahl der Vollstudierenden (ohne beurlaubte, Hörer, Gastteilnehmer) ist gegenwärtig fast 2½mal so hoch als vor dem Kriege. Die Hochschule steht mit dieser Verhältniszahl an der Spitze. Sie ist der Besucherzahl nach mit Hannover und Stuttgart unter die mittleren Hochschulen mit 1500—2000 Studierenden zu rechnen, 4 sind größer, 4 kleiner.

2. Die Zahl der Studentinnen beträgt noch nicht 3 v. H.
3. Der Nationalität nach sind 77 % Deutsche, 23 % Nichtdeutsche.
4. Die Entwicklung der einzelnen Abteilungen ist im ganzen den gleichen Weg gegangen wie im Deutschen Reiche, doch war die Abteilung für Bauingenieurwesen vor dem Kriege an 1., statt an 2. Stelle, nach dem Kriege an 3., statt an 5. Die Abteilungen für Geisteswissenschaften, Mathematik und Physik, Chemie und Schiffbau haben durch die Aufnahme neuer Fächer oder die stärkere Entwicklung bestehender in den letzten Jahren kräftigen Aufschwung genommen. Der verhältnismäßige Rückgang der Abteilung für Elektrotechnik dürfte durch die im Haushalt 1929/30 erfolgte Schaffung einer zweiten ordentlichen Professur eingeholt werden.
5. Die Vorprüfung zum Diplomingenieur haben 33,3 %, die Hauptprüfung 24,5 % der Studierenden bestanden, die Doktorpromotion ist bei 3,3 % vollzogen worden. Der verhältnismäßige Anteil an den Diplomprüfungen ist bei den Abteilungen für Bauingenieurwesen und für Architektur (fast 40 %) am stärksten. Bei den Architekten sind die Zahlen für Vor- und Hauptprüfung einander fast gleich. Die meisten Doktorpromotionen hat die Abteilung für Chemie.
6. Der Lehrkörper ist von 62 auf 73 Mitglieder seit der Vollentwicklung der Hochschule vor dem Kriege gewachsen, also nur um 18 %. Es kommen 22 Studierende auf jedes Mitglied des Lehrkörpers. Der Lehrkörper ist der Anzahl nach der einer kleinen Hochschule, vielleicht der kleinste von allen.
7. Die Zahl der Assistentenstellen ist von etwa 49 auf 77 angewachsen, d. h. um fast 51 %. Es kommen 21 Studierende auf jeden Assistenten.
8. Die Zahl der Vorlesungen und Übungen hat von 260 zur Zeit der Vollentwicklung vor dem Kriege auf 435 zugenommen und ist noch in der Weiterentwicklung begriffen. Es kommen 6 Vorlesungen und Übungen auf jedes Mitglied des Lehrkörpers gegenüber 4 in der Vorkriegszeit. Auf jede Vorlesung und Übung kamen vor dem Kriege etwa 11 Studierende, gegenwärtig 16.
9. Vor dem Kriege kostete die Hochschule 1150 M je Studierender, davon 950 Staatszuschuß, 200 Einnahmen. In den letzten Haushaltsjahren kostete sie in Reichsmark umgerechnet etwa 1200 RM, davon 780 Staatszuschuß, 420 Einnahmen.

Diese Übersicht hat den Nachteil, unpersönlich zu sein. Sie gibt nur dürre Zahlen. Damit allein läßt sich das Leben einer Hochschule nicht ausdrücken. Sie ist mehr als die übrigen Schulgattungen von der Persönlichkeit der Lehrenden abhängig. Stets wird sie von den Besuchern gewogen, und gerade sie ist von einem großen Einflusse auf deren Zahl. Darüber läßt sich in einer allgemeinen Geschichte der Hochschule von vorstehender Art direkt nichts aussagen, wenn auch indirekt die Besucherzahlen manches enthüllen.

Die nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten geben eine gewisse Vorstellung gegenwärtig an der Hochschule tätiger

Persönlichkeiten.

Anmerkungen

1) Nach der deutschen Hochschulstatistik Berlin 1928 waren es für das Sommerhalbjahr 1928 430.

2) Die Zahlen für Hannover und Stuttgart sind den Jahrgängen 1921—1927 des statistischen Jahrbuches für das Deutsche Reich entnommen.

3) Die Trennung in 2 Abteilungen ist erst 1922 durchgeführt; die früheren Zahlen geben beide zusammen an.

4) Die Trennung ist erst 1922 erfolgt. Die Verteilung der Studierenden auf die späteren Teile war nicht einwandfrei durchzuführen.

5) Bis 1927/28 hatten 343 Architekten die Vor-, 324 (94 %) die Hauptprüfung bestanden.

6) Die Vorlesungen und Übungen sind für das ganze Studienjahr zusammengefaßt.

GEISTESWISSENSCHAFTEN

Lessings Entdeckung des Menschen

Von Professor Dr. Heinz Kindermann

Die nachfolgenden Ausführungen geben den Wortlaut des am 21. Januar 1929 bei der Lessing-Feier in der Aula der Technischen Hochschule Danzig gehaltenen Vortrages.

1.

Nichts ist schwerer, als der eigenen Gegenwart gerecht zu werden; nichts scheint leichter, als ein Urteil bereit zu halten über das Vergangene. Aber der Zusammenprall von Gegenwart und Vergangenheit offenbart auch die tiefe Problematik und Verantwortungslast dieser rückgewandten Blickrichtung. Die Gegenwart — als Nachwelt betrachtet: gibt es denn noch viele andere Prüfsteine des Geisteslebens von dieser Feinheit? Man müßte das schöne alte Wort: Sage mir, mit wem du gehst, und ich sage dir, wer du bist, umgewandelt unserer Generation vor Augen halten: Sage mir, wie du die Kulturvergangenheit deines Volkes einschätzt, und ich sage dir, welche Zukunft du verdienst!

Man kann nicht behaupten, daß unser Zeitalter dieses Ringen um die Kulturvergangenheit der eigenen Nation leicht nähme. Denn seit langem ist keine Generation sich so sehr eines inneren Wandels bewußt geworden, als wir Nachkriegsmenschen es sind. Der Historismus des 19. Jahrhunderts, der beglückt die Objektivität des geschichtlichen Entwicklungsganges entdeckt hatte, er steckt uns allen zwar noch in den Knochen; aber wir alle wissen zugleich, daß dieser von außen gesehene Historismus nicht mehr der Auffassung auch des 20. Jahrhunderts entsprechen kann; wir alle empfinden es deutlich, daß der Geschichtsgeist unseres Jahrhunderts — bei aller strengen Sachlichkeit — aus innerem Verstehen glühen muß. Aber durch die Wolken der Unsicherheit ist uns der Strahl der neuen Gnade erst für wenige Landschaften des deutschen Geisteslebens hindurchgebrochen: Mystik und Barock, Sturm und Drang und Romantik, wir haben sie neu erobern können. Der geistige Komplex: Lessing ist uns noch nicht zu neuem Besitz geworden; hier steht die Aufgabe der schöpferischen Neuentdeckung in beklemmender Größe vor uns. Denn wie ein Riese ragt dieses kritische Genie der Deutschen in die Ohnmacht unserer Tage; und das Echo all der Gedenkaufsätze — es ist beherrscht fast von versteckter Angst. Angst davor, Lessings gerechtes Urteil könnte selbst uns noch treffen! Scheu drückt sich unser politisiertes Zeitgewissen um Lessings lächelnde Überlegenheit und bemüht sich, nur die Seite seines Könnens und Wollens zu sehen, die es jeweils sehen will. Sollte es demgegenüber nicht möglich sein, einen Weg zu Lessing zu finden, der die Splitterungen unseres Geisteslebens meidet, der den Willen einer schöpferischen Neuentdeckung Lessings als Einheitswillen des heutigen deutschen Menschen erkennen läßt?

2.

Menschen eines unbefriedigten Übergangszeitalters, wie wir es sind, empfinden zunächst tiefer, als Generationen kultursatter Zeiten den Reiz des gärenden Werdens, die Kämpfe einer erst schwer und allmählich sich durchsetzenden Lebensmacht des Geistes. Es ist deshalb der K ä m p f e r Lessing, der uns noch heute zu leidenschaftlicher Anteilnahme zwingt; der Kämpfer, von dem uns Goethe aus der Seele spricht: „Ein Mann wie Lessing täte uns not, denn wodurch ist dieser so groß, als durch seinen Charakter, durch sein Festhalten"; der Kämpfer Lessing, der mitten in der Welt einer französisch betonten, paneuropäischen Aufklärung in Dichtung und geistesgeschichtlicher Sonderung die Vision des kommenden deutschen Idealismus heraufdämmern läßt.

Was wertbeständig ist an der Ideenwelt der Aufklärung, wird von Lessing dichterisch und kunsttheoretisch zur Höchstentfaltung gebracht; zugleich aber schlägt er dem kommenden Neuen die erste Bresche, öffnet damit den Zukunftsweg einer dem E i g e n w e s e n unseres Volkes gemäßen Kunst- und Kulturentwicklung. Daß Lessing diese beiden widerstrebenden Elemente in Eins zu zwingen vermochte, war Kraft und Tragik zugleich: Kraft der Selbstgerechtigkeit und Tragik des inneren Zwiespalts, dessen vorschauendem Blick und Wollen noch keine vollgestaltende Tat aus der neuen Geistessphäre entsprach. Berührt uns Heutige nicht gerade dies Zwiespältige des Übergangsmenschen Lessing verwandt? Sein kampferfülltes Schaffen war freilich die Morgenröte einer großen, künstlerischen Erfüllung; in unserer neu werdenden Sympathie für Lessing wird deshalb mit dem Trost der Schicksalsanalogie unbewußt zugleich die Hoffnung auf unseren eigenen Tag des kommenden Lichtes mitschwingen . . .

Unsere Nachkriegsgeneration teilt mit Lessing den Grundzug seiner Begabung: die kritischen Fähigkeiten sind stärker entwickelt, als die künstlerische Schöpferkraft. Dennoch will die berühmte Selbstanalyse vom Schluß der „Hamburgischen Dramaturgie" weit mehr sein, weit selbstbewußter genommen sein, denn als Resignation: „Was in den neueren [Dichtungen] Erträgliches ist, davon bin ich mir sehr bewußt, daß ich es einzig und allein der Kritik zu verdanken habe. Ich fühle die lebendige Quelle nicht in mir, die durch eigene Kraft sich emporarbeitet, durch eigene Kraft in so reichen, so frischen, so reinen Strahlen aufschießt: ich muß alles durch Druckwerk und Röhren aus mir heraufpressen. Ich würde so arm, so kalt, so kurzsichtig sein, wenn ich nicht einigermaßen gelernt hätte, fremde Schätze bescheiden zu borgen, an fremdem Feuer mich zu wärmen und durch die Gläser der Kunst mein Auge zu stärken. Ich bin daher immer beschämt oder verdrüßlich geworden, wenn ich zum Nachteil der Kritik etwas las oder hörte. Sie soll das Genie ersticken: und ich schmeichelte mir, etwas von ihr zu erhalten, was dem Genie sehr nahe kömmt." S c h ö p f e r i s c h e Kritik also beherrscht Lessings geistigen Lebensraum — schöpferisch nicht nur in der Theorie, sondern auch in künstlerischer Gestaltung. Ihre Flamme ist es, die Gottscheds morsch gewordene, weil unorganisch dem deutschen Geistesleben aufgepfropfte Pseudoklassik zerstört und zugleich die neu herandämmernden Kräfte des Irrationalen stählt; sie läßt die Mechanik der Stelzentragödie in Schutt und Asche sinken und leuchtet hinein in ein T h e a t e r

wahrhaft deutscher Menschlichkeit! Denn diese deutsche Menschlichkeit muß um diese Zeit erst neu entdeckt werden . . .

3.

Ist es nicht gerade diese Tat, die uns Heutige jenseits aller notgedrungenen Verbeugungen ehrlich den Weg zu Lessing wiederfinden läßt? Steht nicht für unser Gegenwartsbewußtsein wieder das Rätsel: Mensch beherrschend im Vordergrund? Streben nicht alle Bemühungen unserer Kultur darnach, dieses Rätsel zu ergründen, durch alle Verlagerungen hindurch zum Wesen des Ewig-Menschlichen vorzudringen? Wenige sind uns diesen Weg so leidenschaftlich und zugleich doch so souverän vorangegangen, als Lessing!

Bedenken wir, daß die Deutschen der Lessingzeit nicht von der Politik, sondern von Philosophie und Literatur das Heil der Welt erwarteten, dann werden wir die Größe von Lessings Leistung richtig einzuschätzen vermögen. Aber: Drama und Menschendarstellung sind doch naturnotwendig miteinander verknüpft; wieso bedurfte es da erst einer genialen Leistung, um wahrhaftigem Menschentum — und d. h. in diesem Fall: wesensbedingtem Menschentum des eigenen Volkes — zum Durchbruch zu verhelfen?

Das deutsche Drama lebte vor Lessings Auftreten dank Gottscheds Diktat vom Vorbild der französischen Klassik — gewiß nicht aus bösem Willen oder gar aus unnationalen Beweggründen. Im Gegenteil: Gottsched wollte das deutsche Theater aus seinen unwürdigen Niederungen befreien; aber er übersah dabei die Nationalbedingtheit der Tragödien von Corneille und Racine; und er unterließ es, die von den Franzosen mißverstandenen aristotelischen Kunstgesetze auf ihre Herkunft und Entstehung hin zu überprüfen. Daß dort Gesetze bestanden, war dem Aufklärer Gottsched, den Wolff gelehrt hatte, „Ordnung und Wahrheit in der Welt zu sehen", wesentlich. Und während die Antike vom Kunstwerk weiterschritt zur verallgemeinernden Theorie, stand für Gottsched — gleich den Franzosen — die Theorie am Anfang alles Schaffens. Die Theorie, die überdies künstlerisches Gestalten letzten Endes nur gelten ließ als Dienst am moralischen Zweck der Besserung und die sich infolgedessen gar manchmal noch als geistiges Rezept gebärdet. Was sollen wir uns von dieser Art dichterischer Lebensbewältigung versprechen, wenn Gottsched in seiner „Critischen Dichtkunst" auf die selbstgestellte Frage: „Wie greift man die Sache an, wenn man gesonnen ist, als ein Poet ein Gedicht oder eine Fabel zu machen?" antwortet: „Zu allererst wähle man sich einen lehrreichen moralischen Satz nach Beschaffenheit der Absichten, die man sich zu erlangen vorgenommen; hierzu ersinne man sich eine ganz allgemeine Begebenheit, worin eine Handlung vorkommt, daran dieser erzählte Lehrsatz sehr augenscheinlich in die Sinne fällt. Nunmehro kommt es auf mich an, wozu ich diese Erfindung brauchen will, ob ich Lust habe, eine äsopische, komische, tragische oder epische Fabel daraus zu machen." Leben erstarrt hier zur Schablone, an Stelle tausendfältigen Gestaltenwandels rasselt eintönig das Geripp. Diese Vernunftbedingtheit aber, sie mußte nach Gottscheds Willen obendrein gebunden erscheinen an die Einheiten-Regeln der Franzosen, an die deutschem Wesen völlig fremde Pathetik und nicht zuletzt an die unnahbare Kühle

und schematische Schwarz-Weiß-Technik der französischen Tragödie. Das steife Perückenzeremoniell von Standespersonen, deren Handeln wohl vernünftig konstruiert, nicht aber lebenbedingt war, es konnte nur Träger von Ideen und Prinzipien, nicht aber M e n s c h e n brauchen!

4.

Solche Unnatur der Menschendarstellung wurde freilich — neben verschiedentlichen Bemühungen Johann Elias Schlegels — von der Danzigerin K u l m u s, der Gattin Gottscheds, zu durchbrechen versucht; denn in ihrem satirischen Lustspiel „Die Pietisterey im Fischbein-Rock oder die doktormäßige Frau" wird nicht nur das Königsberger Milieu so naturgetreu gezeichnet, daß die Polizei nach der Verfasserin fahndete, sondern in einer Szene ist auch das Leben auf dem Danziger Kohlenmarkt, der damals Trödelmarkt war, mit Naturlauten aus dem Danziger Platt festgehalten, wie man sie heute höchstens noch auf dem Fischmarkt zu hören bekommt. Aber das blieb eine Ausnahme — und außerdem ging selbst dieses Lustspiel von der vorgefaßten satirischen Fabel aus, der die Menschen durchaus als Beziehungs-Typen untergeordnet waren. Ja, selbst das weinerliche Lustspiel des empfindsamen, feinfühligen Gellert weiß nur die philiströse, von oben her gesehene Welt mechanischer Typen zu bieten.

Lessing dagegen l i e b t e den Menschen, den Menschen in seiner Eigenart, in seinem Eigenleben — weil er selbst um sein Eigenleben und Menschenglück schwer zu ringen hatte. In sich selbst den Eigenwert des Menschen zu entfalten, schien ihm von früh an oberstes Gebot. „Ich lernte einsehen, die Bücher würden mich wohl gelehrt, aber nimmermehr zu einem M e n s c h e n machen" schreibt er schon als Student an seine Mutter. Und dieses Streben weg vom Papiergeist hemmender Doktrinen und hin zum flutenden, blutvollen Leben, es durchströmt sein ganzes Wollen und Schaffen, bis hinauf zum „Nathan", in dem noch einmal warnend der Ruf ertönt, daß „die kalte Buchgelehrsamkeit sich mit toten Zeichen ins Gehirn nur drückt"; und bis zur allerletzten Lebensweisheit: „Der aus Büchern erworbene Reichtum fremder Erfahrung heißt Gelehrsamkeit. Eigene Erfahrung ist Weisheit. Das kleinste Kapital von dieser ist mehr wert, als Millionen von jener." Wie symptomatisch, daß der Medizinstudent Lessing vor allem die Vorlesungen über Geburtshilfe besucht, weil immer das Werdende des Menschen ihn fesselt; und daß er schwer fieberkrank in Breslau zu einem ihn besuchenden Freunde meint: „Eben bin ich begierig zu erfahren, was in meiner Seele beim Sterben vorgehen wird."

Dem vorgefaßten Theorem der nurvernünftigen Gottsched-Welt sagt Lessing den Kampf des freien, unvoreingenommenen Blickes an, der dieses Rätsel: Mensch nicht konstruieren will nach Regeln und Rezepten, sondern der es ergründen will mit aller Liebe des Mitmenschen und mit aller Brüderlichkeit volksgleicher, national verwurzelter Art. Glühend müht er sich um eine lebensnahe Gestaltung dieses natürlichen, volksbedingten, beseelten Menschen im Drama — das ihm die Welt bedeutet. Nicht mehr Standeshöhe, nicht Idee-Verkörperung sollte mehr die Eignung der Dramen-Gestalten beweisen, sondern Wesenseigenart des Charakters, Kräfte-

spiel jener seelischen Funktionen, die das wahrhaftige Leben beherrschen. Dies ist die Ursache, warum Lessings dramaturgische Bemühungen von der Theatralischen Bibliothek über die Literaturbriefe und den Laokoon bis zur Hamburgischen Dramaturgie immer wieder ihren Ausgang nehmen vom Charakterologischen — ähnlich, wie sich Philosophie und Psychologie unserer eigenen Zeit wieder bemüht, das Rätsel: Mensch von der Charakterologie aus zu ergründen . . .

5.

Schritt für Schritt, bald kritisch sondernd, bald künstlerisch erfüllend, sucht Lessing sich seinem großen Ziel, der Ergründung des Menschen und seines Wesens, zu nähern. Schon in der Theatralischen Bibliothek nimmt er 1754 diesen Kampf auf. Das Problem der wahren Komödie bietet die erste Möglichkeit eines Vorstoßes. Lessing lehnt sowohl das Possenspiel, das ausschließlich zum Lachen anreizen, wie Gellerts, von Gottsched schließlich gebilligtes, weinerliches Lustspiel, das nur rühren wolle, ab. Dagegen tritt er ein für die wahre Komödie, die beides anstrebe. Die Possenspiele seien für den Pöbel, das weinerliche Lustspiel für die Zärtlinge von Stand; die wahre Komödie aber sei für das Volk als Gesamtheit. Tiefer, als es im ersten Augenblick scheinen mag, läßt schon diese Entscheidung in Lessings Kampfweise hineinsehen; denn gerade weil er das Leben in seinen wahrhaften Verhältniswerten aufzeigen will, scheint es ihm von vornherein bedeutungsvoll, daß jede konstruktive Einseitigkeit vermieden werde. Das wirkliche Leben achtet nicht auf die Grenzen von Weinen und Lachen: die lebensnahe Komödie aber mußte diesem wirklichen Leben nahekommen. Und nahekommen nicht nur im Bezirk der Standespersonen, wie Gottsched es vorgeschrieben hatte. Wolle man aber — in Ermanglung eigener Originalität — nach fremden Vorbildern aussehen, dann dürfe man sich nicht nach den uns ungemäßen romanischen, sondern müsse sich nach den englischen richten. Denn die Engländer hätten vermöge ihrer empirischen Denkform und ihres aufstrebenden Bürgertums das moderne bürgerliche Trauerspiel, den modernen bürgerlichen Roman geschaffen. Dort, nicht in Frankreich, liege die Anregungsquelle für eine Erneuerung des deutschen Dramas. Dieses neue, lebensnahe Drama aber, es sollte auch frei sein vom Zwang der Historie, es sollte aus der Not der Gegenwart hinausschreien und an das Gewissen jedes Einzelnen appellieren können.

Mit fast revolutionärer Geste sucht Lessing in seinem Fragment „Samuel Henzi“ Gegenwartsnot dramatisch zu packen. Im Juli 1749 hatte der Berner Patriot Henzi wegen einer Verschwörung gegen die aristokratische Willkürherrschaft nach Folterungen sein Leben lassen müssen. Schaudernde Entrüstung durchzittert ganz Deutschland; aber niemand findet den Mut zur Entgegnung. Da wühlt Lessing in heiliger Empörung die ersten Akte hin und veröffentlicht sie in den Literaturbriefen. Sein Schaffenswille heißt hier: heutiges Leben, sein Ethos: Mitleid; die lebensnahe Idee kommt zum Ausdruck, die Gestaltung aber bleibt noch stecken in der veralteten Form des Alexandriners, in der noch nicht überwundenen Typisierung der Gestalten.

6.

Eine erste, durchgebildete Erfüllungsstufe erreicht der neue Kunstwille freilich erst in der Prosagestaltung der „Miß Sara Sampson"; Erfüllung nicht nur wegen des Schlichtheitsversuchs einer in Alltagsprosa gehaltenen Tragödie, sondern erste Erfüllung vor allem, weil hier an Stelle des bürgerlichen Freiheitshelden Henzi unheldisches Bürgertum in den Mittelpunkt der Handlung rückt. Rein menschliches Geschehen, das tausendmal sich im Leben zu wiederholen scheint, es ist hier eingefangen im dramatischen Brennpunkt einer katastrophalen Schicksalsgestaltung. Und so sehr gerade dieses Schicksal des Lebemanns zwischen zwei Frauen, zwischen seiner raffinierten einstigen Maitresse Marwood und dem engelreinen, von ihm entführten Mädchen Sara, so sehr gerade die hier zugrundeliegende Lebensidee den aus der Aufklärung Hervorgegangenen hätte verleiten können zu moralisierender Kritik — Lessing hat sich von ihr freizuhalten gewußt; er will nicht richten, sondern verstehen. Die Katastrophe: Saras und Mellefonts Tod, sie erwächst naturnotwendig aus innerer, tragischer Schuld und nicht, wie bei Gottsched, aus von außen herangetragener, vernünftiger Moralpose. Nur der Mensch und seine hemmungslose Leidenschaft finden Lessings Interesse. Dem deutschen Drama war damit — trotz aller Sentimentalität — ein neuer Weg geebnet: und nicht nur thematisch, sondern auch charakterologisch; denn selbst die Maßlosigkeit Marwoods und ihr schäumendes Temperament: „Ich will mit begieriger Hand Glied von Glied, Ader von Ader, Nerve von Nerve lösen, und das Kleinste derselben auch da noch nicht aufhören zu schneiden und zu trennen, wenn es schon nichts mehr sein wird, als ein empfindungsloses Aas. Ich — ich werde wenigstens dabei empfinden, wie süß die Rache sei" — selbst diese (der Form nach schon sturm- und drangmäßige) Leidenschaftsgestaltung ist noch mit Zügen positiver Menschlichkeit ausgestattet. Der Kampf, den Lessing in der Dramaturgie dann aufnimmt gegen die Schwarz-Weiß-Zeichnung der Charaktere und zugunsten der lebenswahren Mischung von Gut und Böse, die jeder Mensch repräsentiere, er ist hier in der dichterischen Praxis vorweggenommen. Und vorweggenommen vor allem zugunsten eines leidenschaftlichen, empirisch vorgehenden Realismus: „Darin sind wir doch wohl einig," schreibt Lessing 1757 an Mendelssohn, „daß alle Leidenschaften entweder heftige Begierden oder heftige Verabscheuungen sind. Auch darin, daß wir uns bei jeder heftigen Begierde oder Verabscheuung eines größeren Grades unserer Realität bewußt sind und daß dieses Bewußtsein nicht anders als angenehm sein kann." Steigerung der Leidenschaften erhöht also unser Realitätsbewußtsein, intensiviert die Ausdrucksfähigkeit unseres Ich. Und das schwerwiegende Resultat dieser Erkenntnis: für Lessing steht nicht mehr „der moralisch-vollkommene, sondern der leidenschaftlich bewegte Mensch" (Cassirer) im Brennpunkt dramatischer Gestaltung.

Auch diese Eroberung freilich würde einseitig geblieben sein, wäre nicht noch ein letzter Schlag gegen die Mechanik der aufklärerischen Lebensgestaltung geführt worden. In seiner Fabelabhandlung (1759) versucht Lessing, das Wesen der „Handlung" zu ergründen und von ganz neuen Seiten her zu beleuchten: „Gibt es doch wohl Kunstrichter, welche einen so materiellen Begriff mit dem Wort

Handlung verbinden, daß sie nirgends Handlung sehen, als wo die Körper so tätig sind, daß sie eine gewisse Veränderung des Raumes erfordern. Sie finden in keinem Trauerspiele Handlung, als wo der Liebhaber zu Füßen fällt, die Prinzessin ohnmächtig wird, die Helden sich balgen; und in keiner Fabel, als wo der Fuchs springt, der Wolf zerreißt und der Frosch die Maus sich an das Bein bindet. Es hat ihnen nie beifallen wollen, daß auch jeder innere Kampf von Leidenschaften, jede Folge von verschiedenen Gedanken, wo die eine die andere aufhebt, eine Handlung sei; vielleicht weil sie viel zu mechanisch denken und fühlen, als daß sie sich irgendeiner Tätigkeit dabei bewußt wären." Damit ist für die Dynamik der Handlung wie der Charaktere das Eis gebrochen. An die Stelle des äußeren Zwecks tritt innere Notwendigkeit, an die Stelle sophistischer Zufallslogik das Weltgesetz des seelisch Möglichen.

7.

Schritt für Schritt hatte Lessing damit eine Schwierigkeit nach der anderen aus dem Weg geräumt und nun war die Bahn frei für die weiterwirkende Tat: dichterisch und kunsttheoretisch. Schlag auf Schlag traten deshalb die beiden Hauptwerke Lessingscher Prägung vor die deutsche Öffentlichkeit: die Hamburgische Dramaturgie und Minna von Barnhelm. Überlegen rückt nun in der ganzen dialektischen Schärfe, die Lessing zu Gebote steht, die neue Eroberung des Menschen in helles Licht; die seelische Dynamik der neuen Charakterologie beherrscht unumstritten weithin das gesamte Feld der Dramaturgie. Bald flackert das Hohnwort empor, die Dichter möchten doch auch, wenn sie Standespersonen zeichnen, aus Maschinen Menschen formen; bald wird hineingeleuchtet in das Allzuirdische dieses Daseins, das immer wieder Mitleid und Furcht, und nicht nur eines von beiden in sich berge; bald taucht die Forderung nach innerer Wahrscheinlichkeit der Charaktere auf; bald wird Diderot auf die „Klippe der vollkommenen Charaktere" verwiesen; bald wettert Lessing gegen das Gekünstelte eines pathetischen Dialogs, der die Personen nur zu Sprachrohren des Verfassers mache und ihnen damit ihr Eigenleben benehme; bald dämmert die Erkenntnis empor: „Das menschliche Leben ist nichts, als eine beständige Kette solcher Übergänge [vom Rührenden zum Lächerlichen und vom Lächerlichen zum Rührenden] und die Komödie soll ein Spiegel des Lebens sein"; bald wird das Wachstum der Leidenschaften aus dem Eigenwesen der Charaktere gefordert, bald eine „Sprache des Herzens" ersehnt und schließlich das Höchstmaß erreicht mit der Erkenntnis: „Ich habe mich vielmehr dahin geäußert, daß die Charaktere dem Dichter weit heiliger sein müssen, als die Fakta."

Aber das Gebot blieb nicht bloße Formel; die beiden Meisterdramen: Minna von Barnhelm und Emilia Galotti, sie sind höchste Erfüllungen dessen, was für den Übergangsmenschen Lessing schaffensmöglich war. Wer wollte angesichts unserer Gegenwartsdramatik wagen, den Stein aufzuheben gegen diese Werke, deren Ruf der Johannes-Ruf der Sturm- und Drang-Dramatik und damit des emporquellenden deutschen Idealismus war!

Waren die Menschen der Miß-Sara-Tragödie zwar schon leidenschaftsentfesselt, aber doch in ihrem Wesen noch völlig gebunden an die spezielle Handlung dieses Dramas — in der „Minna" stehen wir vor eigenbedingten, modern-psychologischen Entfaltungen. Nichts hier mehr von armseliger Typik, nichts hier mehr von bloßer Handlungsbedingtheit, sondern alles lebenverwurzelte Individuen von einmaliger Prägung, von Wirklichkeitsberechtigung, auch jenseits des dramatischen Geschehens. Tellheim, Werner, Just, Minna und Franziska, der Wirt und Riccaut: keiner von ihnen ist glattweg der schablonisierte Typ seines Berufs, seiner privaten oder gesellschaftlichen Lebensfunktion; aber keiner von ihnen auch wurzelt in seiner Besonderheit lediglich im Vorwurf des Dramas. Wie die Vielfalt des Weltgeschehens jedem Menschen sein eigenes, seltsam gewordenes, aus tausend, nur in diesem Fall giltigen Zusammenhängen erwachsenes Geschick zumißt, so stehen die Personen der „Minna" vor uns: jeder aus seinem Sondergeschick verständlich, jeder aus diesem vergangenheitsbedingten Eigenwesen heraus wirkend in dem ihm menschlich erreichbaren Umkreis. Wirkend freilich nicht nur im Reflex äußerer Geschickseinwirkungen oder sozialer Voraussetzungen, sondern vor allem wirkend aus den mit diesem Geschick, mit diesen sozialen Voraussetzungen erwachsenen seelischen Energien. Individuelles Seelenleben wird hier erstmalig zur Triebkraft der Persönlichkeitsgestaltung; wirklich lebendige Menschen betreten hier zum erstenmal die deutsche Bühne. Menschen, die trotz ihrer eigenbedingten Verschiedenheit alle hindurchgegangen sind durch das gleiche Los des großen Krieges; Deutsche also, deren jeder in seiner Weise unphiliströs teilhat an den Geschicken seines Volkes . . .

Eine Horizonterweiterung ohnegleichen für die deutsche Dichtung; dies um so mehr, als zugleich das aufklärerische Handlungsziel des Lustspiels: nämlich Kur einer Hauptperson von irgendeiner lächerlichen oder schädlichen Eigenschaft, fallen gelassen und vielmehr das Reifen der Charaktere zum Lustspiel-Ziel erhoben wurde: Tellheim dringt aus dem konventionell und standesmäßig gebundenen Wesen allmählich heraus und der Mensch, die gesunde Natürlichkeit siegt über steifen Ehrgeiz und erzwungene Haltung. Und Minna verwandelt ihre verzärtelte Empfindlichkeit in echt weibliches Verstehen- und Achtenlernen auch der schwächeren Seiten des männlichen Charakters. Daß Lessing dieses Reifen der Charaktere nicht in der Atmosphäre des aufklärerischen Witzes, sondern des gefühlsbetonten, irrationalen Humors vor sich gehen läßt, zeigt den Gang der weiteren Entwicklung, den nun das deutsche Drama zu nehmen imstande ist.

Fast noch konsequenter geht Lessing schließlich in seinem Trauerspiel „Emilia Galotti" vor. Eine bürgerliche „Virginia" war Lessings Ziel gewesen — eine tragische Anklage der sozialen Gegenwartsverhältnisse die dichterische Lösung. Die große Geste antiker Schicksalhaftigkeit, Lessing hat versucht, sie aus dem verbitterten Vibrieren deutschen Bürgerstolzes in innerster Notwendigkeit gegenwärtigen Weltverstehens wiedererstehen zu lassen. Lessing hatte einmal an Shakespeare gerühmt, er lasse die tragischen Gefühle aus dem Leid der Menschen wachsen. Nichts anderes ist der Impuls dieses geradezu psychologischen Leidenschaftsdramas. Die unendliche Feinheit, mit der Lessing uns die

seelischen Wallungen und Erschütterungen Emilias miterleben läßt, der faszinierende Leichtsinn, die verführerische Liebenswürdigkeit des Prinzen, die sittlichen Qualen Odoardos und nicht zuletzt die sinnen- und machtgierige Vollblutgestalt der fast schon subjektivistisch gesehenen Orsina — trotz aller Bindung an deutsche Erfüllungsmöglichkeiten aristotelischer Gesetze: eine Symphonie des Tragisch-Allzumenschlichen. Wie symptomatisch, daß trotz immer schärfer werdender Spannung zwischen absolutistischem Fürsten- und geducktem Bürgertum für Lessing das Agitatorische des sozialen Kampfes keineswegs im Vordergrund steht. Sein Drama ist Spiegelung atembeklemmender Mißverhältnisse. Als geistiges Ziel aber wächst nicht die Frage nach ihrer Beseitigung, sondern ausschließlich wieder die rätselhafte Dämonie des Mensch-Seins empor . . .

8.

Miß Sara, Minna, Emilia — drei Formungen wahrhaft menschlichen Geschehens, bald Aufschrei, bald Lächeln, bald liebeglühend, bald schuftig, niemals aber bloß gut und bloß böse, sondern immer in ewig-menschlicher Mischung. Ja, diese Mischung — die Lessings Forderung, die Personen so handeln und fühlen zu lassen, daß die Zuschauer bekennen müssen, sie hätten in gleicher Lage das gleiche getan, vom Standpunkt einer „inneren Wahrscheinlichkeit" her ermöglicht — sie erweckt erst den Pulsschlag des Lebens und strömt das Blut heißen Menschentums in die Gestalten. Und dies Geheimnis ist der eigentliche Schlüssel zu Lessings Erfolg. Denn alle Nuancen des Mensch-Seins von allgemein-nationaler oder religiöser Eigenart bis zu den feinsten Reaktionen sittlicher und seelischer Eigenheiten, von sozialen Wesenselementen bis zu letzten Empfindlichkeiten ererbter Züge, von den Geschlechtsunterschieden bis zu leisesten Nachwirkungen einstiger Erziehung — sie alle haben durch Lessings Vorstoß zum wahrhaften Menschen Raum gewonnen. „Wahrhaft" freilich nicht im Sinn von naturalistisch-kopiert, sondern wie für unser eigenes Zeitalter eines magischen Realismus im Sinne von „wesensecht".

Diese revolutionäre Geistestat Lessings, diese Entdeckung des deutschen Menschen, sie konnte freilich nur deshalb so überzeugend wirken, weil er neben das blasse, für uns nicht maßgebliche Bild der französischen Pseudoklassik das lebensprühend-saftvolle Shakespeares stellte und damit für die Deutschen die größte weltliterarische Errungenschaft seines Jahrhunderts vollbrachte.

Lessing und Shakespeare: die Kraftquellen der Sturm- und Drangbewegung, dieser notwendigen Brücke zur deutschen Klassik, in deren Heiligtum Lessing selbst am Ausgang seines Schaffens mit der verklärenden Milde des „Nathan" einzutreten versuchte. Noch fühlen wir überall, gerade auch im „Nathan", Lessings Herkunft von der Aufklärung durch, noch ist es die Geste des Vorpostenkämpfers und nicht die des Siegers, die Lessings Schaffen charakterisiert. Aber ohne diesen Vorpostenkampf, der zugleich schon Durchstoß war, wäre Goethes und Schillers Höhenleistung nicht möglich geworden.

„Vormals im Leben ehrten wir dich wie einen der Götter,
Nun du tot bist, so herrscht über die Geister dein Geist“

lautet das Weimarer Bekenntnis.

Wir aber grüßen den Kämpfer Lessing, der in seiner lächelnden Überlegenheit an Mozart gemahnt — und unsere Sehnsucht wünscht seine Kraft herab auf den, der da kommen soll, das bessere Morgen des deutschen Geistes zu bereiten. Sein Lebenstag hat Lessing — gleich unserer Generation — manche bittere Enttäuschung gebracht. Sein Werk und mehr noch sein Geist aber müssen ins Grenzenlose deutschen Kulturschicksals wirken — nach dem zuversichtlichen Nietzsche-Wort, das allem genialen Schaffen gilt: „Erst das Übermorgen gehört mir . . .“

Friedrichs des Großen Anschauungen von Staat und Fürstentum

Von Professor Dr. Friedrich Luckwaldt

Friedrich der Große steht heute im Mittelpunkt des nationalen Interesses oder doch der nationalen Agitation. Weite und sehr wertvolle Kreise des deutschen Volkes schwören bei seinem Namen, um so ihre Sehnsucht nach dem alten monarchischen Militärstaat zum Ausdruck zu bringen, dessen beste Traditionen und glorreichste Leistungen auf Friedrich zurückgehen. Leider ist mit der Begeisterung für den großen König nicht auch das Wissen um den großen König gewachsen. Im Gegenteil, indem die Fridericusleute in Friedrich nicht nur den persönlich bedeutendsten Vertreter der preußisch-deutschen Vergangenheit sehen möchten, sondern einen Führer zu neuer Größe und neuem Glück, laufen sie Gefahr, sein historisches Bild zu verdunkeln und zu verschieben, gewisse Seiten seines Wesens zu überbetonen und andere abzuschwächen oder zu verschweigen. Gerade auch seine Anschauungen von Staat und Fürstentum werden leicht mißverstanden oder entstellt. Nun hat, nachdem schon Georg Küntzel einiges Wichtige und Wegweisende gesagt hatte[1]), Friedrich Meinecke in seinem großangelegten Buch: „Die Idee der Staatsräson in der neueren Geschichte" sich eingehend (S. 340—424) mit Friedrich als politischem Denker auseinandergesetzt, aber die besondere Blickrichtung auf jenes eine Problem der Staatsräson bringt es mit sich, daß daneben Raum für eine mehr allgemein gehaltene Übersicht bleibt.

In Friedrich durchdrangen sich aufs eigentümlichste aktive und kontemplative Neigungen. Er war nicht nur Praktiker, wie es im wesentlichen Napoleon und Bismarck sein wollten, sondern zugleich und sehr stark Theoretiker. Wenn er sich roi philosophe nannte, so meinte er damit nicht bloß einen König, der nebenher für sein Privatvergnügen bei Tisch und nach Tisch philosophierte, sondern einen König, der sein Amt philosophisch nahm, der ein philosophisches Regierungssystem aufstellte und durchführte. Gerade die Verbindung von Philosophie und Politik, der Versuch, die Politik zu rationalisieren, sie aus der Vernunft zu begreifen und nach der Vernunft zu gestalten, gibt ihm, wie man bemerkt hat, unter den großen Staatsmännern der Welt die besondere Note.

Bekanntlich hat er sich schon als Kronprinz schriftstellerisch mit den Problemen des Staatslebens beschäftigt, vor allem im Antimachiavell von 1739, der, so wenig er für die Kritik des großen Florentiners besagen will, doch eine starke Talentprobe bleibt und über den prinzlichen Autor wie über die Verhältnisse und Anschauungen seiner Zeit viele wertvolle Aufschlüsse enthält. Später finden sich staatsphilosophische Betrachtungen in den Mémoires pour servir à l'histoire de Brandebourg und in der Histoire de mon temps, namentlich ihren verschiedenen Vorreden[2]), auch in dem „Fürstenspiegel" für den jungen Herzog Karl Eugen von Württemberg (1744) und den beiden Episteln Apologie des Rois und Epitre à mon Esprit (1749)[3]), und

der alte König hat neben kritischen Auslassungen über Holbach (Examen de l'Essai sur les préjugés und Examen critique du Système de la nature, beide 1770) zwei eigene Abhandlungen geschrieben: Essai sur les formes de gouvernement et sur les devoirs des souverains 1777 und Lettres sur l'amour de la Patrie 1779. Bedeutender aber als alles dies sind die beiden großen Politischen Testamente von 1752 und 1768, übrigens eigentlich keine Testamente, sondern systematische politische Lehrschriften über die Aufgaben eines Königs von Preußen. Nachdem sie endlich 1920 vollständig und sehr sorgfältig herausgegeben worden sind [4]), ermöglichen sie einen ganz sicheren, oft überraschenden Einblick in die politische Gedankenwelt Friedrichs.

Auch sein Vater hatte ein ähnliches Vermächtnis hinterlassen, die berühmte Instruktion für seinen Nachfolger aus dem Jahre 1722. Zwischen ihr und dem ersten Politischen Testament des Sohnes liegt nur gerade ein Menschenalter, und doch ist die geistige Struktur eine vollkommen andere. Friedrich Wilhelm I. schreibt noch als deutscher Territorialfürst alter Schule. Sein geistiger Horizont ist eng ohne alle Problematik, seine Moral die des ehrenfesten, aber eigennützigen und etwas unvornehmen Bürgers; gibt er doch etwa den klassischen Rat, bei einem Reichskrieg gegen Frankreich das schuldige Reichskontingent von 14 000 Mann nicht aus der eigenen Armee zu nehmen, sondern Truppen deutscher Kleinfürsten zu mieten und sich das dafür aufgewandte Geld und noch etwas mehr eben vom Reichsfeind Frankreich erstatten zu lassen, weil diesem so ein importanter Dienst geschehe. Seinen Untertanen steht er als christlicher Hausvater gegenüber, seine Staaten sieht er an wie Landgüter. Ihre Vermehrung erhofft er allererst von der Gnade Gottes, die deshalb durch gottesfürchtigen Wandel erworben werden muß. Der Grundakkord ist: „Mein lieber Sukzessor sei wohl versichert, daß alle glücklichen Regenten, die Gott für die Augen haben, keine Metressen, es besser zu nennen Huren haben und ein gottseliges Leben führen, diese Regenten wird Gott mit allem weltlichen und geistlichen Segen beschütten." „Haltet rein Gewissen vor Gott. Alsdann Ihr eine glückliche Regierung führen werdet." Am Anfang findet sich das Bekenntnis: „Mit Gott, dem allerhöchsten, stehe ich wohl", und den Schluß, nicht nur des Ganzen, sondern jedes wichtigen Abschnitts macht die Gebetsformel: „Dazu verhelfe ihm der allmächtige Gott durch Jesum Christum. Amen."

Für Friedrich fiel zunächst einmal der Gedanke an eine religiöse Bedeutung und Bedingtheit des Fürstenamts ganz fort. Die Formel von Gottes Gnaden sagte ihm gar nichts. Wenn er im Antimachiavell freilich noch den Fürsten das lebende Bild der Gottheit, einen Gott auf Erden genannt hatte, so gab er solche Wendungen später in der Auseinandersetzung mit Holbach ausdrücklich preis und erklärte, nicht bestreiten zu wollen, daß die Herrscher ihre Macht nicht von göttlicher Autorität hielten (Oeuvres IX, 151). Immer wieder betonte er seine Geringschätzung des Religiösen. Es war ihm bloßer Bestandteil der Politik und kein sehr wichtiger. Das Testament von 1752 stellte fest, es sei sehr gleichgültig, ob ein Fürst Religion habe oder nicht, alle Religionen liefen auf eine mehr oder minder absurde Fabelei hinaus (S. 31), und 1768 hieß es entsprechend von den Untertanen, für den Staat komme es nicht darauf an, welche metaphysische Meinung im Gehirn der Menschen herrsche, es genüge ihm, wenn jedermann sich als guten vaterlandsliebenden Bürger aufführe (S. 184).

Die Vorstellung eines christlichen Staates, wie sie später den Romantiker Friedrich Wilhelm IV. so stark erfüllte, war damit ausgeschlossen. Dem Sohn der Aufklärung erschien der Staat als Menschenwerk, und zwar nach seinem Ursprung als ein Werk nicht des Fürsten, sondern des Volkes. Vorbehaltlos machte er sich die seit mehr als einem Jahrhundert herrschende Theorie zu eigen, die ihn aus einem Vertrag seiner Bürger ableitete. Sogar den Rousseauschen Ausdruck vom Gesellschaftsvertrag, pacte social, hat er in seinen Altersschriften gebraucht (Oeuvres IX, 196, 215). Gleich das erste Kapitel des Antimachiavell wirft die Frage auf, was die freien [5]) Menschen bewogen habe, sich Herren zu setzen, und gibt die Antwort: „Die Völker haben für ihre Ruhe und Erhaltung nötig gefunden, Richter zu haben, um ihre Streitigkeiten zu schlichten, Beschützer, um sie gegen ihre Feinde im Besitz ihrer Güter zu halten, Fürsten, um alle ihre verschiedenen Interessen in ein Gesamtinteresse zu vereinen. Sie haben zuerst aus ihrer Mitte diejenigen gewählt, von denen sie glaubten, daß sie die weisesten, gerechtesten, uneigennützigsten, menschlichsten und tapfersten seien." Ähnlich, nur noch bezeichnender ist eine vereinzelte Stelle in den fast gleichzeitigen, sonst der Gegenwartspolitik gewidmeten Considérations sur l'état présent du corps politique de l'Europe (Oeuvres VIII, 25 f.): „Wenn die Fürsten auf den Zweck ihrer Einsetzung zurückgehen wollten, so würden sie sehen, daß . . . ihre Erhebung nur ein Werk der Völker ist, daß diese Tausende von Menschen, die ihnen anvertraut sind, sich nicht einem einzelnen versklavt haben, um ihn furchtbarer und mächtiger zu machen, daß sie sich nicht einem Bürger unterworfen haben, um das Opfer seiner Launen und der Spielball seiner Einfälle zu sein, sondern daß sie denjenigen aus sich gewählt haben, von dem sie meinten, daß er der gerechteste sei, um sie zu regieren, der beste, um ihnen als Vater zu dienen, der menschlichste, um mit ihrem Unglück zu empfinden und ihnen zu helfen, der tapferste, um sie gegen ihre Feinde zu verteidigen, der weiseste, um sie nicht zu ungelegener Zeit in zerstörende und verderbliche Kriege zu verwickeln, kurz der geeignetste Mann, um das Staatsganze zu vertreten (à représenter le corps de l'Etat)." Auch vierzig Jahre später entwickelt die Abhandlung über Regierungsformen und Herrscherpflichten, daß die Völker ursprünglich keinen Gesellschaftskörper (corps de société) bildeten. Erst die Gewalttaten und Plünderungen benachbarter Horden ließen in den vereinzelten Sippen den Gedanken entstehen, sich mit anderen Familien zusammenzuschließen, um durch wechselseitige Verteidigung ihre Besitzungen zu sichern. Daraus entstanden Gesetze und zu ihrer Wahrung Obrigkeiten, die das Volk erwählte, und denen es sich unterordnete. Der alte König meint das nicht nachdrücklich genug betonen zu können: „Man präge sich wohl ein," schreibt er, „die Aufrechterhaltung der Gesetze war der einzige Grund, der die Menschen bewog, sich Obere zu setzen; denn das ist der wahre Ursprung der Herrschergewalt" (Oeuvres IX, 196).

Entsprechend solchem Ursprung ist ihm das Fürstentum kein göttliches oder privates Recht, sondern ganz einfach ein Amt. Das Politische Testament von 1752 beginnt mit den wie in Stein gemeißelten Sätzen: „Die erste Pflicht eines Bürgers ist, seinem Vaterland zu dienen. Diese Verpflichtung habe ich in all den verschiedenen Umständen meines Lebens zu erfüllen gesucht. Betraut, wie ich es bin, mit dem ersten Amt (première magistrature), habe ich die Gelegenheit und die Mittel

gehabt, mich meinen Mitbürgern nützlich zu machen." Auch das Testament von 1768 wiederholt den Gedanken der Bürgerpflicht und des ersten Amtes, wenngleich es nicht mehr von concitoyens spricht. Die Lieblingswendung Friedrichs ist im übrigen die von dem ersten Diener des Staates. Sie war nicht ganz originell. Schon Fénélon im Télémaque hatte gesagt, der König sei ein Sklave des Volkes, und Bayle verzeichnete als Meinung einiger Autoren, die Fürsten seien des valets, des commis ou des procureurs du peuple [6]). In offenbarer Anlehnung daran sagt der Antimachiavell noch domestique du peuple. Erst weiterhin hat Friedrich domestique durch das würdigere serviteur und peuple durch Etat ersetzt. In den Regierungsformen und Herrscherpflichten von 1777 heißt es: „Wenn der Fürst der erste Richter, der erste Feldherr, der erste Finanzmann, der erste Minister der Gesellschaft ist, so ist er das nicht, damit er repräsentiert, sondern damit er deren Pflichten erfüllt. Er ist nur der erste Diener des Staates, gehalten, mit Redlichkeit, mit Weisheit und vollkommener Uneigennützigkeit so zu handeln, als wenn er jeden Augenblick seinen Bürgern Rechenschaft über seine Verwaltung ablegen sollte" (Oeuvres IX, 208).

Das klingt ungemein demokratisch. Aber der König verstand die Verantwortung lediglich als eine moralische. Den Satz Holbachs, daß die Untertanen das Recht haben müßten, ihre Fürsten abzusetzen, meinte er in langen Darlegungen ad absurdum führen zu können (Oeuvres IX, 166). Auch in der Abhandlung von 1777 verrät sich an anderer Stelle, daß er über die patriarchalische Auffassung des Fürstentums, die sich mit seiner Staatstheorie schlecht vertrug, gefühlsmäßig noch keineswegs ganz hinausgewachsen war. „Der Herrscher", sagt er da — mit einer merkwürdigen Wendung, die an sich schon die Vermischung der Begriffe zeigt — „ist recht eigentlich das Haupt einer Familie von Bürgern (le chef d'une famille de citoyens), der Vater seiner Völker" [7]). Ja, er betrachtet den Staat gleichsam als Eigentum des Fürsten. Um zu begründen, weshalb der König das Steuer nicht den „Mietlingshänden" der Minister [8]) überlassen dürfe, setzt er auseinander: „Die Menschen hängen an dem, was ihnen gehört. Der Staat gehört den Ministern nicht, sein Wohl liegt ihnen also nicht wahrhaft am Herzen . . . Der Herrscher ist durch unlösbare Bande an das Ganze des Staates gebunden . . . Der Herrscher repräsentiert den Staat. Er und seine Völker bilden bloß einen Körper . . . Der Fürst ist für die Gesellschaft, die er regiert, was das Haupt für den Körper ist: er muß für die ganze Gemeinschaft sehen, denken und handeln."

Wer diese Sätze genau untersucht, findet leicht Widersprüche. Ist der Fürst der erste Diener des Staates, so repräsentiert er ihn nicht, und repräsentiert er ihn, so hat er ihn doch nicht zu eigen. Eins aber steht über all solche Widersprüche hinaus fest: Friedrich hat die denkbar höchste Meinung von seinem Fürstenberuf; denn auch in der Wendung vom „ersten Diener des Staates" darf das „erster" nicht übersehen werden. Nicht daß er ein unbedingter Lobredner der absoluten Monarchie an sich gewesen wäre. In seiner Kronprinzenzeit erschien ihm sogar die englische Verfassung als ein Muster der Weisheit, weil dort das Parlament Schiedsrichter sei zwischen Volk und König, und wenn er später über die englischen Verhältnisse kritischer dachte — schon 1750 spricht er von ce gouvernement turbulent et orageux (Oeuvres IX, 21) —, so meint doch noch die Abhandlung über die Regierungsformen von 1777 ganz kühl, die wahrhaft monarchische Regierung sei die schlimmste

oder die beste, je nachdem sie geführt werde (Oeuvres IX, 198). Vor seinen Mitfürsten hatte er nicht den mindesten Respekt. Im Testament von 1752 sagt er einmal, wenn er von Maria Theresia und Karl Emanuel von Savoyen absehe, seien sie alle erlauchte Dummköpfe, d'illustres imbéciles [9]). Auch sein dynastisches Gefühl war wenig entwickelt. Es ist bekannt, mit welcher im ganzen doch etwas ungerechten Schärfe, durchaus ohne Pietät, er über seinen Großvater, den ersten König, geurteilt hat. Er geht so weit, ihm Niedrigkeiten und kindliche Verschwendung vorzuwerfen. In das gleiche Kapitel gehören die Bemerkungen seines ersten Politischen Testamentes über die Prinzen von Geblüt, diese Amphibien zwischen Fürst und Privatmann, denen man alle möglichen äußeren Ehren, aber keinen Einfluß auf die Geschäfte einräumen und keine Intrigen und Kabalen verstatten dürfe. Kurz, Meinecke hat sehr recht: „Das fürstliche Individuum in ihm absorbierte merkwürdig früh und rasch das fürstliche Milieu in ihm [10])." Aber eben das fürstliche Individuum brachte sich mit außerordentlicher Stärke zur Geltung. Friedrich Wilhelm I. hatte in der Instruktion für seinen Nachfolger verkündet: „Ein Regente, der mit honneur in die weldt regieren will, muß seine affehren alles selber tun." Ganz instinktiv stellt sich auch Friedrich von Anfang an auf diesen Standpunkt, und es ist nun interessant zu sehen, wie er das, was er fühlt, und was ihn die Praxis lehrt, mit Vernunftgründen zu stützen sucht. Er sagt im Politischen Testament von 1752 (S. 38 u. 77): „Eine gut geleitete Regierung muß ein System haben, das so fest in sich zusammenhängt wie ein philosophisches System. Ein System kann nur aus einem Kopf kommen. Newton hätte sein System der Schwerkraft nicht aufstellen können, wenn er mit Leibniz und Descartes zusammen gearbeitet hätte. Ebenso läßt sich ein politisches System nicht machen oder durchführen, wenn es nicht aus einem Kopf kommt. Also (donc) muß es aus dem Kopf des Fürsten kommen."

Gegen diese Kette von Schlüssen lassen sich vom Standpunkt der Logik und auch der Erfahrung leicht Einwendungen erheben. Man mag schon die erste Voraussetzung, den Nutzen des Systems, in Zweifel ziehen und wird jedenfalls sagen müssen, daß das System recht wohl auch von einer Körperschaft, Ministerrat, Staatsrat, Parlament, und wenn es denn schon ein einzelner sein soll, von einem Premierminister festgestellt werden kann. Aber so wenig die Beweisführung für uns überzeugend ist, so hell leuchtet sie in die Gedankenwelt des Königs hinein. Er hatte in der Tat ein System [11]), hatte es in viel höherem Grade als etwa Bismarck, der sich gern dem Impuls des Moments, dem Instinkt, „dem andern Kerl in mir" überließ und zu dem Spruch bekannte: Unda fert nec regitur. Gelegentliche Plötzlichkeiten und Willkürlichkeiten, die auch bei Friedrich vorfielen, können doch nicht darüber täuschen, daß er sich in der inneren wie in der äußeren Politik streng an gewisse feststehende Grundsätze band. Wenn wir seine Politischen Testamente von 1752 und 1768 und sein abkürzendes Exposé du gouvernement prussien von 1776 [12]) zusammenhalten, finden wir erstaunlich wenig Verschiedenheiten und Entwicklung. Der 64jährige König denkt genau so wie der 40jährige, ja nicht einmal zwischen dem 40jährigen König und dem 27jährigen Kronprinzen des Antimachiavell ist der Unterschied gar so groß.

Insbesondere tritt schon im Antimachiavell ein Teil seines Systems auf das stärkste hervor, die Abneigung gegen jedes Ministerregiment. Das 22. Kapitel sagt: „Zwei Arten von Fürsten gibt es in der Welt, solche, die alles mit eigenen Augen sehen und ihre Staaten selbst regieren, und solche, die sich auf ihre Minister verlassen . . . Die Herrscher der ersten Gattung sind wie die Seele ihrer Staaten, das Gewicht ihrer Regierung liegt auf ihnen allein wie die Welt auf dem Rücken des Atlas. Ihre Minister sind nur Handwerkszeug (outils) in den Händen eines weisen und geschickten Meisters. Die Herrscher der zweiten Ordnung sind wie versunken in lethargische Gleichgültigkeit . . . In diesem Fall ist der Fürst nur das Organ seines Ministers, seine Person ist für den Staat ebenso unnütz, wie die des Ministers notwendig ist. Bei den Fürsten der ersten Art kann die gute Wahl der Minister ihre Arbeit erleichtern, ohne jedoch viel auf das Glück des Volkes einzuwirken (!), bei denen der zweiten Art hängt das Wohl des Volkes und ihr eigenes von der Auswahl der Minister ab[13])." „Und", setzt der Kronprinz dann weiter auseinander, „diese Auswahl ist schwer. Zwar wird ein Fürst von Geist sich ohne Mühe ein Urteil bilden über das Genie und die Fähigkeit seiner Diener, aber fast unmöglich ist es für ihn, ihre Uneigennützigkeit und Treue richtig abzuschätzen." Später erscheinen ihm als abschreckendes Beispiel namentlich die Zustände in Frankreich, wo die vier Minister des Krieges, der Marine, der Finanzen und des Auswärtigen wie „vier Könige" herrschten, einer aus Eifersucht umwerfe, was der andere geschickt aufgebaut habe, kein System, kein Plan sei und der Zufall regiere. Er erklärt einen Ministerrat für das schädlichste, was es gebe. Weise Ratschläge kämen nie aus großen Gesellschaften; die Dinge würden dunkler statt klarer, und das Geheimnis, die Seele der Geschäfte, gehe verloren[14]). Ein Premierminister ist demgegenüber immerhin vorzuziehen. Aber auch er hat nicht die Autorität des legitimen Königs, hat vor allem nicht die Uneigennützigkeit, die hohe Stellung über den streitenden Privatinteressen. Selbst von Richelieu meint Friedrich, ein König an seiner Stelle hätte noch mehr leisten können, und aus der Geschichte seines eigenen Hauses weist er warnend hin auf Schwarzenberg, der Georg Wilhelm verraten habe, und Wartenberg, der zum Teil für die Fehler Friedrichs I. verantwortlich gewesen sei. Friedrich I. gilt ihm geradezu als Schulfall, wie ein Fürst nicht sein soll. Dagegen sieht er Vorbilder in dem einst so wenig verstandenen Vater und im Großen Kurfürsten, dem er nachrühmt, daß er alles selber gemacht und den soliden Grund für die Größe des Staates gelegt habe. Auf die Dauer würden die Fürsten, die am meisten Fleiß, Ausdauer, System und unveränderliche Grundsätze zeigten, immer den Vorteil haben vor Nachbarn, die die Zügel der Regierung den Händen ihres Ministers überließen (S. 191). Er verkennt gewiß nicht ganz die Abhängigkeit des neuzeitlichen Fürsten von seinem Beamtentum. Am Ende seines Lebens in den Briefen über die Vaterlandsliebe 1779 stellt er die Betrachtung an, daß gute Monarchien, deren Regierung weise und voll Milde sei, heutzutage der Oligarchie näherkämen als der Despotie. „Vergegenwärtigen Sie sich die Menge von Personen, die in den Ministerien, in der Justiz, im Finanzwesen, bei auswärtigen Gesandtschaften, im Handel, in der Armee, bei der inneren Verwaltung angestellt sind. Fügen Sie hinzu noch diejenigen, welche Sitz und Stimme in den Landständen haben. Sie alle nehmen teil an der souveränen Autorität (participent à l'autorité souveraine)." Aber dann

geht die Erörterung doch dahin weiter: „Man muß den Fürsten als den Mittelpunkt betrachten, in dem sich alle Linien der Peripherie vereinigen“ (Oeuvres IX, 216). Fast mit denselben Worten sagt das Testament von 1768 (S. 191): „Es bedarf eines Mittelpunktes, der alle Linien der Regierung vereint. Wenn nicht alles zum selben Ziel führt, wenn nicht alle Welt für denselben Zweck arbeitet, wird immer etwas Schadhaftes in der Regierung sein, sei es beim Militär, sei es bei den Finanzen, sei es bei der Politik.“ Das Testament von 1752 hatte dafür das berühmte Bild gehabt (S. 77 f.): „Alle Teile der Regierung haben miteinander eine enge Verbindung. Die Finanzen, die Politik und das Heer sind unzertrennlich. Es genügt nicht, daß einer dieser Teile gut verwaltet werde; sie müssen es alle sein. Sie müssen Stirn an Stirn gelenkt werden wie die Rosse am Wagen der olympischen Spiele, die, gleichmäßig ins Geschirr gehend, die vorgeschriebene Bahn mit Windeseile durchmaßen, den Wagen ans Ziel brachten und ihren Lenker zum Sieger machten.“

Nun könnte es manchmal scheinen, als wenn von diesem Dreigespann doch das Heerwesen seine Aufmerksamkeit ganz überwiegend in Anspruch genommen hätte. Er hat die militärischen Pflichten des Fürsten jederzeit besonders stark betont. Schon im 12. Kapitel des Antimachiavell erklärt er, hier mit dem Gegner übereinzustimmen. „Der Fürst muß die Verteidigung seiner Untertanen als eine der wichtigsten Aufgaben seines Amtes ansehen, die er aus diesem Grund nur sich selbst anvertrauen darf.“ An dieser Auffassung hat der prince-connétable, wie er sich wohl nennt, lebenslang festgehalten. Im Exposé von 1776 heißt es kurz und bündig: „Wenn der Fürst sich nicht selbst mit dem Heerwesen befaßt und nicht das Beispiel dafür gibt, ist alles zu Ende.“ Im Politischen Testament von 1768 ist ein volles Drittel dem Militärwesen gewidmet, und das Testament von 1752 setzt auseinander, daß das Militär in Preußen der erste Stand sein müsse, ebenso wie es das bei den Römern gewesen sei, als diese Eroberer der Welt in der Periode der Vergrößerung gestanden hätten. Da nun in einem monarchischen Staat das Volk immer auf den Fürsten hinblicke, seinem Geschmack folge, die Eindrücke aufnehme, die er gebe, so müsse in Preußen der Fürst sich an die Spitze des Heeres setzen. Dadurch erhalte dieser Beruf das nötige Ansehen. Schon vor dem Thronfolger solle man von dem Militär nur mit dem heiligen Respekt reden, mit dem die Priester ihre schimärische Offenbarung behandelten. „In unserem Staat ist es sicherlich eine Ehre, gemeinsam mit der Blüte des Adels und der Auslese der Nation an der Befestigung dieser Disziplin zu arbeiten, die den Ruhm des Vaterlands aufrechterhält, es im Frieden geachtet und im Krieg siegreich macht[15]).“

Solche und ähnliche Worte, deren es viele gibt, verdienen gewiß volle Beachtung. Der militärische Geist und der Erobererwille waren in Friedrich wohl stark entwickelt. Er meinte zu sehen, daß der Drang nach Vergrößerung zum Wesen der Staaten gehöre, und hielt es für eine der Pflichten des Fürsten, diesen Drang zu befriedigen. „Das erste Augenmerk eines Fürsten“, sagt das Politische Testament von 1768, „muß sein, sich zu halten, das zweite, sich zu vergrößern.“ Aber er war doch keineswegs eine „Eroberungsbestie“, wie Ranke vielleicht auch nicht ganz mit Recht Napoleon genannt hat. Wenn er im Antimachiavell gelehrt hatte: „Ein Fürst, der alles besitzen will, ist wie ein Magen, der sich mit Fleisch überlädt,

ohne zu bedenken, daß er es nicht verdauen kann", so war ihm diese Einsicht auch später nicht verloren. Es erschien ihm dauernd noch wichtiger, die alten Besitzungen zu sichern und zu entwickeln, als neue zu erwerben, schon weil er den Raum unter- und die Volkszahl überschätzte[16]). Jedenfalls hatte seine Staatsauffassung neben der militärisch-machtpolitischen eine andere Seite. Der Staat, wie er ihn im Auge hatte, war doch sehr stark, in der Theorie sogar überwiegend Rechts- und Wohlfahrtsstaat. Wir hörten schon, Friedrich leitete die Entstehung des Staates aus dem Bedürfnis nach Rechtspflege, nach Wahrung der Gesetze her. Die Fürsten sollten ganz ursprünglich Richter gewesen sein[17]). Entsprechend handelt gleich der erste Abschnitt in beiden Politischen Testamenten von der „Verwaltung der Justiz", und wenn auch nicht gerade viel darüber gesagt wird — eine einzige Druckseite —, so findet sich doch die sehr wichtige Maxime, daß in den Gerichtshöfen die Gesetze sprechen mußten und der Fürst schweigen. Des Fürsten Aufgabe sei nur, die Gesetze zu schützen.

Die Gesetze selbst aber wünschte der König milde. Friedrich gilt vielfach für einen harten Menschenverächter, und es lassen sich Aussprüche genug zitieren, die das zu beweisen scheinen. Aber man soll das Wort niemals zu wörtlich nehmen, zumal nicht bei Leuten, deren Zunge und Feder rasch sind. Friedrichs wahre Meinung trifft am besten wahrscheinlich der Schlußsatz der sonst wenig gelungenen „Abhandlung über die Gründe zur Aufrichtung und Abschaffung von Gesetzen" aus dem Jahre 1750: „Sich einbilden, daß die Menschen sämtlich Teufel sind, und sie mit Grausamkeit verfolgen, ist die Wahnvorstellung eines scheuen Menschenhassers; voraussetzen, daß die Menschen alle Engel sind, und ihnen die Zügel schießen lassen, ist der Traum eines törichten Kapuziners; glauben, daß sie weder alle gut noch alle schlecht sind, die guten Handlungen über ihren Wert hinaus belohnen, die schlechten unter dem, was sie verdient hätten, strafen, Nachsicht für ihre Schwächen und Menschlichkeit für alle haben: so muß ein vernünftiger Mensch handeln" (Oeuvres IX, 33). Die Begriffe Tugend und Glückseligkeit, die in den Kundgebungen der Aufklärungszeit immer wieder begegnen, waren auch Friedrich vertraut und teuer. Wie sich in seiner persönlichen Lebensführung mit den stoischen bis zuletzt epikureische Elemente mischten — Sans hair Zénon, j'estimais Epicure, schrieb er 1749[18]) und noch 1780 an d'Alembert, er werde sich mit lachendem Antlitz begraben lassen —, war auch seine Staatsanschauung nicht frei von Eudämonismus. Als Aufgabe des Staates erschien ihm, die Bürger tugendhaft und glücklich zu machen. Das 25. Kapitel des Antimachiavell schließt mit einem Satz, der bei Friedrich zunächst überrascht, aber ganz 18. Jahrhundert ist: „Am glücklichsten ist das Land, wo wechselseitige Nachsicht von Souverain und Untertanen über die Gesellschaft jene liebenswürdige Süße (douceur aimable) verbreitet, ohne die das Leben eine Last ist und die Welt ein Jammertal statt eines Schauplatzes der Freuden (théâtre de plaisirs)." Man wende nicht ein, das sei freundliche Illusion der Jugend. Der alte Fritz schlägt ganz ähnliche Töne an. In der Abhandlung von 1777 nennt er das Vaterland die „Zuflucht unseres Glückes" (l'asile de notre bonheur) und meint, der „allgemeine Trieb der Menschen, sich das größtmögliche Glück zu verschaffen", habe Anlaß zur Bildung der verschiedenen Regierungsformen gegeben

Gelegentlich beschäftigt ihn das Problem des Verhältnisses von Privat- und Staatswohl. Er fragt im Politischen Testament von 1768: „Soll man in Sachen der Steuern das Staatswohl dem Wohl der einzelnen vorziehen?“ Die Antwort, mit der er sich begnügt, lautet: „Der Staat ist aus Einzelbürgern zusammengesetzt, und es gibt nur ein Wohl für den Fürsten und seine Untertanen.“ Das heißt eine Schwierigkeit wegdekretieren, statt sie zu lösen. Die logischen Einwendungen gegen die Gleichung: Fürst gleich Staat gleich alle Einzelbürger, liegen auf der Hand. Aber der König entwickelt dann sehr verständig, daß Bauer, Bürger und Edelmann das Gros ihres Einkommens für sich behalten und der Regierung nur einen Teil abgeben müßten (S. 129). An anderer Stelle (S. 112) empfiehlt er eine „proportionelle“ Besteuerung, die den Reichen stärker heranziehe als den Armen. Wer 100 Taler Einkommen habe, solle nicht mehr als zwei Taler Steuern zahlen; von 1000 könne man 100 verlangen. Die Steuern dürften weder von dem Arbeiter noch von dem Soldaten noch von dem Armen erhoben werden, sondern von dem wohlhabenden oder reichen Bürger. Noch in der Kronprinzenzeit hatte er einmal ausgesprochen — Bismarch hat mehrfach daran erinnert —: „Quand je serai roi, je serai un vrai roi des gueux“, und auch weiterhin erklärte er es für eine Pflicht des Fürsten, an die Lage des armen Volkes zu denken, sich an die Stelle eines Bauern oder Handwerkers zu versetzen, ein Herz zu haben für den letzten Armen wie für den ersten Hofmann. Er müsse eine Art Ausgleich herstellen zwischen den Reichen und den Armen, ein Schiedsrichter zwischen den Ständen sein (Oeuvres IX, 205, 209).

Wir nennen das heute sozialen Sinn. Der König begriff es mit unter dem Schlagwort seiner Zeit: Humanität. Humanität, sagte er, müsse bei der Festsetzung der Steuerarten die erste Stimme haben (S. 112). Auf die Notwendigkeit von Humanität wies er überhaupt bei jedem Anlaß hin. Der Fürstenspiegel für den jungen Herzog Karl Eugen von Württemberg 1744 schärft ein: „Sie sind für Ihr Land das Haupt der bürgerlichen Religion, die aus der Rechtschaffenheit und allen moralischen Tugenden besteht. Es ist Ihre Pflicht, sie üben zu lassen und an erster Stelle die Humanität, die Kardinaltugend jedes denkenden Wesens[19].“ Ähnlich heißt es im Politischen Testament von 1752 (S. 34): „Die nützlichsten Tugenden bei den Staatsbürgern sind Humanität, Billigkeit, Tapferkeit, Wachsamkeit und Arbeitsliebe“ — Humanität ist an die Spitze gestellt —, und der Abschnitt über die Erziehung des Thronfolgers gipfelt in den Worten (S. 105): „Die hauptsächlichste Sorge seiner Umgebung muß sein, sein Herz zu bilden, ihn dankbar zu machen für Dienste, zärtlich gegen seine Freunde, mitleidend mit dem Unglück der Menschen, erfüllt von den Gefühlen der Seelengröße, der Vornehmheit, des Edelmutes, jenes hohen Ehrgeizes, der die schönen Seelen dazu führt, ihresgleichen an Verdiensten zu übertreffen, und besonders möchte ich, daß man ihn human mache, sanft, zur Gnade geneigt und tolerant.“ Ein Fürst soll sein Volk lieben und bei allen Gelegenheiten schonen, wo es von ihm abhängt (S. 26). Gerade für einen König von Preußen ist das auch nicht schwer. Er ist, wie Friedrich damals (1752) meint, mehr in Verlegenheit, genügend Belohnungen für gute als genügend Strafen für schlechte Handlungen zu finden. Nur selten hat er Gelegenheit, Strenge anzuwenden (S. 33 f.). Gefahren für seinen Thron sind nicht zu fürchten. Schon der Antimachiavell hatte erklärt mit Worten, die 50 Jahre später so grausam Lügen gestraft werden sollten:

„Die Mode der Aufstände und der Revolutionen scheint heutzutage ganz vorüber zu sein" (Oeuvres VIII, 117). Ebenso stellte das Testament von 1752 fest (S. 29), es seien weder Parteiungen noch Erhebungen zu besorgen. 1768 nach manchen bitteren Erfahrungen seufzt der König dann wohl, daß das Volk schwerfällig und faul sei und immer glaube, ihm solle der Hals abgeschnitten werden, wenn es sich um eine nützliche Reform handele (S. 129), und der Abschnitt „Über Strafen und Belohnungen" ist ersichtlich auf einen kühleren Ton gestimmt. Aber es wird doch wiederholt, daß man sich mit leichten Strafen begnügen könne, und noch der Aufsatz über Regierungsformen und Herrscherpflichten von 1777 fordert, daß der Herrscher lieber zu nachsichtig als zu streng sei.

Alles das war nicht Phrase, Pose, Selbstbetrug, wozu es mißgünstige Kritik gemacht hat. Meinecke urteilt richtig: „Friedrich hat es bitter ernst und heilig genommen mit der Aufgabe, seinen Untertanen das höchste, mit den Anforderungen seines Staates vereinbare Maß von irdischem Glück, materieller Wohlfahrt, Erweckung der Vernunft und sittlicher Tüchtigkeit zu verschaffen [20])." Aber freilich liegt hier starker Nachdruck auf dem einschränkenden Zusatz über die Anforderungen des Staates. Setzten sich bei Friedrich gegen das, was vom Standpunkt des Kulturstaates und Rechtsstaates wünschenswert gewesen wäre, die Bedürfnisse des Machtstaates, so gingen sie allemal vor. Darüber gab es nie Zweifel oder Bedenken. Verlangte die Rücksicht auf den Staatsschatz die Forterhebung von Abgaben, die dem König „das Herz bluten ließen" (S. 25), so blieben sie bestehen. Ließ sich das Heer nur durch barbarische Mittel ergänzen und zusammenhalten, so hatte die Humanität zu schweigen. Noch einmal Meinecke zu zitieren: „Soweit man sieht, hat Friedrich diese Barbarei seines Militarismus niemals zum Problem seines Nachdenkens gemacht, niemals versucht, ethischere und humanere Prinzipien in seine Grundlagen einzuführen. In diesen dunklen Grund staatlicher Macht leuchtete er mit dem Licht seiner Humanität nicht hinein. Hier war er selber in der dunklen Naivität des Handelnden befangen [21])." Es war ein Widerspruch, den er wahrscheinlich überhaupt nicht empfand [22]) und jedenfalls nicht zu lösen suchte.

Auch mit zwei anderen Widersprüchen, die sich doch bereits herausstellten, ist der König nicht fertig geworden, mit dem Widerspruch des alten Territorien- und des werdenden Nationalstaates und mit dem Gegensatz von Ständestaat und Bürgerstaat.

Der Staat der Vertragstheorie, die der König sozusagen unbesehen übernahm, setzte ein einheitliches Staatsvolk voraus. Die Staaten, Provinzen und Länder aber, deren Regierung ihm zufiel, waren keineswegs einheitlich, großenteils nur durch das willkürliche Spiel dynastischen Erbrechtes zusammengebracht. Die Schwierigkeit, die hier lag, entging dem König nicht. Er gab sich Mühe, so etwas wie einen preußischen Nationalgeist zu erziehen. „Es ist notwendig," schärft das Testament von 1752 ein, „dem Adel Standes- und Nationalgefühl (esprit de corps et de nation) beizubringen. Daran habe ich gearbeitet und während des ganzen Verlaufs des ersten Krieges alles mögliche angestellt, um den Namen Preußen durchzusetzen und allen Offizieren beizubringen, daß, aus welcher Provinz sie auch seien, sie alle als Preußen angesehen würden, und aus diesem Grund alle Provinzen, wenn auch voneinander abgeschnitten, doch ein gemeinsames Ganze bildeten (font un corps

ensemble, S. 30)." In diesem Sinn gilt es ihm später als schöner Zug, der sorgfältig der Erinnerung aufbewahrt werden muß, daß die Magdeburger im Siebenjährigen Krieg 40 000 Taler gesammelt haben, um sie den von den Russen ausgeplünderten Pommern zu schicken. Aber der Nachdruck, mit dem das hervorgehoben wird, deutet darauf hin, wie selten solch gemeinsames Empfinden der einzelnen Landesteile noch war, und der König selbst, der meist nicht von seinem Volk, sondern von seinen Völkern redet, hielt für richtig, ihre Verschiedenheiten, aus denen er sich ein eigenes Studium gemacht hatte [23]), bei der Verwaltung weitgehend zu berücksichtigen. Das Politische Testament von 1752 setzt auseinander: „Die zahlreichen Provinzen, die den Staat bilden, nehmen in der Breite mehr als die Hälfte von Europa ein (eine merkwürdig irrige geographische Vorstellung). Da sie unter verschiedenen Himmelsstrichen gelegen sind und Sitten, Gebräuche und Handel haben, die ihrer Lage angemessen sind, würde es unmöglich sein, in den Einzelheiten ihrer Verwaltung dieselben Grundsätze zu befolgen . . . Sie nach denselben Gesetzen regieren wollen, hieße, sie mutwillig (de gaieté de coeur) zugrunde richten" (S. 11, 12). Daran hat er entgegen andersartigen Ratschlägen, die nicht fehlten, bis ans Ende festgehalten. Der allen gemeinsame selbstregierende Fürst erscheint ihm eben doch als genügende Bürgschaft für den Zusammenhalt der „Preußischen Staaten", wie sie noch das Preußische Landrecht statt eines Preußischen Staates kennt.

Erst recht nicht an den ständischen Schranken dachte er zu rütteln. Die Stände seien nur in der Türkei vermischt, und die Dinge gingen darum dort nicht besser, meint er in der Kritik von Holbachs Essai sur les préjugés 1770 (Oeuvres IX, 140). Seine Staatstheorie kannte nur Bürger, und gelegentlich erinnerte er sich daran. So wies die Instruktion für den Erzieher des Prinzen Friedrich Wilhelm, den Major Grafen Borcke, 1751 diesen an: „Behandeln Sie meinen Neffen wie einen Privatmann, der sein Glück machen soll . . . Er muß lernen, daß alle Menschen gleich sind, und daß die Geburt nur eine Schimäre ist, wenn nicht das Verdienst hinzukommt" (Oeuvres IV, 39). Aber er selbst sah doch sehr auf die Geburt. Der Geburt nicht geben, was ihr gebührt, betont er gegen Holbach, sei Ausfluß nicht philosophischer Freiheit, sondern bourgeoiser und lächerlicher Eitelkeit. Kein König von Preußen vorher oder nachher hat eine so ausgesprochene Vorliebe für den Adel gezeigt. Seine Politischen Testamente können sich einfach nicht genug tun im Lob dieser digne et fidèle noblesse. Die Edelleute sind ihm die Zier seiner Krone und der Glanz seiner Armee, Fundament und Säulen des Staates, unentbehrlich für die Verwaltung und erst recht für die Armee. Man könne einen reicheren, aber keinen tapfereren und treueren Adel finden [24]). Im Gegensatz zu seinem Vater widerrät er die Vergrößerung des Domänenbesitzes, weil sie nur auf Kosten des Adels erfolgen könne, sucht vielmehr die Adelsfamilien auf ihren Gütern zu halten — gern hätte er das Majorat eingeführt (S. 130) —, macht ihnen Zuwendungen, sichert ihre Privilegien gegen Bürger und Bauern. Seine Urteile über die Bürger müssen selbst dann noch befremden, wenn man sich vor Augen hält, daß das deutsche Bürgertum des 18. Jahrhunderts nicht war, was das Bürgertum des 16. gewesen war, oder was das Bürgertum des 19. werden sollte, daß seine besten Köpfe wie Goethe, der hier keineswegs einen Ausnahmefall darstellt, es selbst mit dem Adel hielten.

Das Testament von 1768 hat die harten Worte: „Wenn die Roturiers sich in den Besitz von Landgütern setzen, öffnen sie sich den Weg zu allen Ämtern. Die meisten denken niedrig und machen schlechte Offiziere. Man kann sie nirgendwo hinschicken (S. 130).“ Und das Exposé von 1776 meint gar, die Ersetzung adliger Offiziere durch bürgerliche würde der erste Schritt sein zum Verfall und zum Sturz der Armee (S. 240). Im Testament von 1752 gibt es einen Abschnitt Des villes et des bourgeois. Er umfaßt gerade acht Zeilen und ist ganz unbedeutend. Für die Bauern zeigte der König nach Art des echten Aristokraten immerhin mehr Verständnis und Interesse. Im Politischen Testament von 1768 sagte er: „Die Bauern bilden eine achtbare Körperschaft im Staat, sie sind seine Grundlage, sie tragen seine Last. Die Mühe ist für sie und der Ruhm für andere. Sie verdienen, daß man an sie denkt, sowohl um ihre Lage zu verbessern wie um nicht ganz ihre Vernunft zu vernachlässigen (ne pas négliger entièrement leur raison, S. 132). An anderer Stelle, wo er von der Heeresergänzung spricht, will er gar „diese nützlichen und fleißigen Leute wie seinen Augapfel gehütet“ wissen (S. 140). Im Testament von 1752 hatte er entwickelt, der Fürst müsse eine Art Gleichgewicht halten zwischen den Bauern und dem Edelmann, derart, daß sie sich nicht wechselseitig zugrunde richteten (S. 31). Er wollte darauf gesehen wissen, daß seine Domänenpächter die Bauern nicht bedrückten. Auch die Lage der gutsherrlichen Bauern hätte er gern erleichtert. Die Hörigkeit, die vielfach noch herrschte, war ihm ärgerlich. Aber er mochte sich doch ebensowenig an ihre Abschaffung wagen wie Katharina II. an die der Leibeigenschaft. In den „Regierungsformen und Herrscherpflichten“ heißt es kritisch und doch resigniert: „Sicherlich ist kein Mensch dazu geboren, der Sklave von seinesgleichen zu sein. Man verabscheut mit Recht solchen Mißbrauch und meint, es genüge zu wollen, um dies barbarische Herkommen abzuschaffen. Dem ist aber nicht so; es stützt sich auf alte Verträge zwischen den Grundherren und den Ansiedlern. Der Ackerbau ist auf die Frondienste der Bauern zugeschnitten. Wollte man diese abscheuliche Einrichtung mit einemmal beseitigen, so würde man die ganze Güterwirtschaft über den Haufen werfen.“

Alles das, schon damals für die jüngere Generation vielfach enttäuschend, liegt weit ab von heutigen Zuständen, Bedürfnissen und Empfindungen. Friedrichs Staatspraxis und Staatstheorie waren zeitgebunden und sind nicht in größerem Umfang wiederherzustellen, so gern man einzelne goldene Regeln befolgt sehen möchte. Ein dauernder kostbarer nationaler Besitz aber bleibt die Kraft, die von seiner Persönlichkeit ausgeht. Er hat in der schönen Totenklage um seinen Lieblingsneffen Heinrich 1767 sicher nicht ohne Hinblick auf die eigene Leistung den stolzen Satz geprägt: „Die Stärke der Staaten beruht auf den großen Männern, die ihnen zur rechten Stunde geboren werden.“

Anmerkungen

Der vorstehend abgedruckte Aufsatz ist erstmals in der Schulte-Festschrift veröffentlicht worden: Historische Aufsätze, Aloys Schulte zum 70. Geburtstag gewidmet von Schülern und Freunden, Düsseldorf 1927. Er erscheint hier mit um so größerem Recht noch einmal, als er aus Übungen des Danziger Historischen Seminars hervorgegangen ist und seine erste Form in einem Vortrage fand, den ich in der Aula der Technischen Hochschule während der Deutschkundlichen Woche im Oktober 1926 halten durfte.

⚙

1) Zum Gedächtnis Friedrichs des Großen. Marine-Rundschau XXIII, S. 201—219, 1912, dann großenteils wörtlich übernommen in „Die drei großen Hohenzollern", Meister der Politik, II. Bd. Dazu „Der junge Friedrich und die Anfänge seiner Geschichtsschreibung" in der Festgabe für Friedrich von Bezold, S. 234—249.

2) Darüber Meusel, Friedrich der Große als historisch-politischer Schriftsteller. Preußische Jahrbücher, Bd. 120.

3) Nicht recht dahin gehört die Dissertation sur les raisons d'établir ou d'abroger les lois, 1750, die überdies wenig ergiebig ist. Sie wie die übrigen Abhandlungen aus der Königszeit Oeuvres IX, die Episteln Oeuvres X, 204—222.

4) Politische Korrespondenz Friedrichs des Großen. Ergänzungsband: Die Politischen Testamente Friedrichs des Großen, redigiert von Gustav Berthold Volz. Deutsche Ausgabe: Klassiker der Politik, herausgegeben von F. Meinecke und H. Oncken. Bd. V: Friedrich der Große, Die Politischen Testamente, übersetzt von F. von Oppeln-Bronikowski. 1922.

5) Dazu Kapitel IX (Oeuvres VIII, 91): „Il n'y a point de sentiment plus inséparable de notre être que celui de la liberté . . . comme nous naissons sans chaînes nous prétendons vivre sans contrainte."

6) Meinecke, Idee der Staatsraison, S. 350.

7) Oeuvres IX, 209. Ähnlich in den Briefen über Vaterlandsliebe: „Un royaume bien gouverné doit être comme une famille, dont le souverain est le père et les citoyens ses enfants". Oeuvres IX, 216.

8) „En des mains mercenaires, je veux dire à ses ministres." Oeuvres IX, 199. Die weiteren Zitate unmittelbar anschließend.

9) Politische Testamente, S. 103. Vgl. auch Apologie des rois:

Ces vulgaires rois sans honneur, sans mérite
Endormis sur le trône ou pleins de vains projets

und Epitre à mon esprit:

Le hasard qui préside au destin de la vie
Fait au plus grand héros succéder quelquefois
Un stupide foetus sur le trône des rois,
Qui végète sans vivre, et, des humains l'arbitre,
N'a pour toute vertu que l'enflure d'un titre.

Oeuvres X, 211 u. 217.

10) Idee der Staatsraison, S. 346.

11) Allerdings heißt es noch im Antimachiavell (Oeuvres VIII, 251): „L'esprit de système a été de tout temps un écueil fatal pour la raison humaine . . . La rage des systèmes n'a pas été la folie privilégiée des philosophes, elle l'est aussi devenue des politiques."

12) Oeuvres IX, 183—191. Jetzt auch Politische Testamente, S. 238—245.

13) Oeuvres VIII, 272 f. Ich zitiere nach der Originalfassung: Réfutation du Prince de Machiavel. Der von Voltaire zum Druck gebrachte Antimachiavell ist hier kürzer, vielleicht um französische Empfindlichkeiten zu schonen.

14) Politische Testamente, S. 37 f., S. 189 ff.

15) Politische Testamente, S. 78—80, 104, 240.

16) Am stärksten Antimachiavell 5. Kapitel. Vergleich zwischen Holland und Rußland. Oeuvres VIII, 77.

17) „S'ils sont généraux, c'est un accessoire." Oeuvres VIII, 107.

18) Epitre à mon esprit, Oeuvres X, 221.

19) Oeuvres IX, 6. Auch an das Vorwort zur Henriade von 1739 (Oeuvres VIII, 54) wäre zu erinnern: „La Henriade ne respire que l'humanité, cette vertu si nécessaire aux princes ou plutôt leur unique vertu."

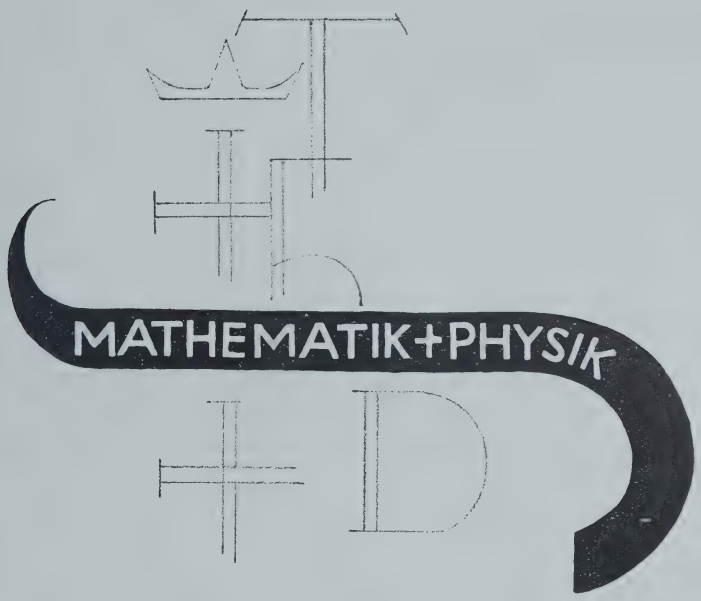
20) Idee der Staatsraison, S. 353.

21) Ebenda, S. 357.

22) Eine Andeutung immerhin in der Epitre à mon esprit: „Que je fus roi sévère et citoyen humain." Oeuvres X, 221.

23) Politische Testamente, S. 27—29, 177—180.

24) Politische Testamente, S. 14 f., 26, 29, 78.


MATHEMATIK+PHYSIK

Über Auswertungsverfahren bei der Brownschen Bewegung

Von Prof. Dr. Eberhard Buchwald

1. Was macht die Beschäftigung mit den Problemen der Brownschen Bewegung so anziehend? Messe ich etwa die Intensitätsverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers, so gewinne ich schon während der Beobachtung eine Vorstellung vom ungefähren Schlußergebnis: das Ansteigen der Intensität, den Durchgang durch ein Maximum, den langsamen Abfall. Und ähnlich bei den meisten Beobachtungsreihen der messenden Physik. Nach ein paar Beobachtungsstunden an der Brownschen Bewegung oder einem verwandten statistischen Phänomen trage ich dagegen einige tausend völlig oder fast völlig regellose Zahlenwerte heim: Teilchenzahlen in verschiedenen Höhenlagen, Abstände, die in einer gegebenen Zeit zurückgelegt worden sind, oder Ähnliches. Und erst die theoretische Ordnung läßt aus diesem anscheinend wirren Durcheinander eine Gesetzmäßigkeit von oft überraschend glatten Kurvenzügen hervortreten.

Vielleicht ist es dieser immer wieder beglückende Übergang vom scheinbaren Chaos zu einem klaren Bilde, der stets von neuem gelockt hat, vielleicht auch, daß sich das gleiche Bild in zahlreichen Zweigen der Atomphysik bewährt, von den kolloidalen Lösungen bis zur natürlichen Meßgrenze kleinster elektrischer Ströme, und in vielen reizvollen Erscheinungen anschaubar zu machen ist.

Mag aber sein, daß hierbei noch in anderer und tiefer liegender Weise ein Übergang von Unordnung in Ordnung mit Befriedigung empfunden wird. Wir sehen im makroskopischen Geschehen stets den umgekehrten Vorgang, von der Ordnung zur Unordnung, „von selbst" verlaufen und haben diesen Erfahrungskomplex als zweiten Hauptsatz an die Spitze der klassischen Thermodynamik gestellt: die Wellen zertrümmern das gestrandete Schiff, aber sie bauen aus Trümmern kein Schiff auf; der Leichnam wird zu Staub, aber aus Staub wird nicht „von selbst" ein toter Mensch, geschweige denn ein lebender; und die geordnete Bewegung des fallenden Steins geht beim Aufschlagen in die ungeordnete Wärmebewegung der Umgebung über, während es kaum zu erwarten ist, daß der liegende Stein Wärme aus der Unterlage aufnimmt und entsprechend in die Höhe steigt. Gerade hier aber wird im Mikroskopischen und Submikroskopischen das Gegenteil beobachtet: die Brownsche Partikel, in einem Augenblick in Ruhe, tut dergleichen. Sie entnimmt der ungeordneten Wärmebewegung der umgebenden Flüssigkeit die nötige Energie, daß ihre Millionen Atome sich geordnet bewegen, in einer Translation in horizontaler oder selbst in vertikaler Richtung oder in einer Rotation.

Diese Überführung einer streng kausalen Gesetzmäßigkeit, der klassischen Aussage des zweiten Hauptsatzes, in eine nur statistische legt dann die Frage nahe, ob ein Gleiches für alle makroskopischen kausalen Gesetzmäßigkeiten gelte, weiter die, ob das Kausale sich somit in das atomare Geschehen zurückziehen müsse und ob es selbst da noch eine Stätte behalte, widrigenfalls wir die kausallose Physik gewonnen hätten, — Fragen, die, wie eine starke Zeitströmung beweist, ohne weiteres weder abzulehnen noch zu beantworten sind [1]).

2. Nach dieser Kennzeichnung der allgemeinen Zusammenhänge unseres Gebiets sei zu einer Sonderfrage übergegangen. Der Verfasser hat sie vor Jahren angeschnitten [2]) und vor kurzem einer Teillösung zugeführt [3]). Sie tauchte bei folgendem Problem auf: zählt man in äquidistanten Zeitpunkten 0, τ, 2τ . . . die in einem optisch abgegrenzten Teilvolumen v eines Sols befindlichen Partikeln, so ist jede Zahl der gewonnenen Reihe n_0, n_1, n_2 mit der vorangehenden gekoppelt, insofern eine mit wachsendem τ abnehmende Wahrscheinlichkeit Q_τ besteht, ein einmal mitgezähltes Teilchen auch bei der nächsten Zählung noch in v anzutreffen. Sie ist nicht nur mit den Nachbarzahlen gekoppelt, sondern mit allen andern: die Teilreihen n_0, n_2, n_4 ... oder n_1, n_3, n_5 ... enthalten Zahlenangaben von geringerer, dem Zeitabstand 2τ entsprechender Koppelung $Q_{2\tau}$, die Teilreihen n_0, n_3, n_6 ... oder n_1, n_4, n_7 ... oder n_2, n_5, n_8 ... die dem Zeitintervalle 3τ entsprechenden von noch geringerer Koppelung $Q_{3\tau}$ usw. Mit Hilfe einer überraschend einfachen Smoluchowskischen Formel, die den Abschluß umständlicher Rechnungen bildet, ließ sich aus dem mittleren Differenzquadrat aufeinanderfolgender Teilchenzahlen bei der ursprünglichen Reihe das Q_τ, bei den beiden 2τ-Reihen das $Q_{2\tau}$ usw. berechnen, und die experimentellen Q-Werte stimmten zum Teil mit der Rechnung, zum Teil ergaben sich Abweichungen von der im übrigen einleuchtenden Theorie, nämlich ein Gang in einem von der Theorie als konstant verlangten Rechenausdruck, die sich nachträglich auch in anderen Messungen [4]) nachweisen ließen und zunächst ungeklärt blieben. Doch wurde bereits damals die Vermutung ausgesprochen [5]), daß die Abweichungen nicht einen Widerspruch zwischen Experiment und Theorie bedeuteten, sondern in der Art der Auswertung bgründet wären, derzufolge man z. B. den Wert $Q_{2\tau}$ aus den zwei Teilreihen n_0, n_2, n_4 ... und n_1, n_3, n_5 ... entnahm, aus Teilreihen also, die voneinander nicht unabhängig waren.

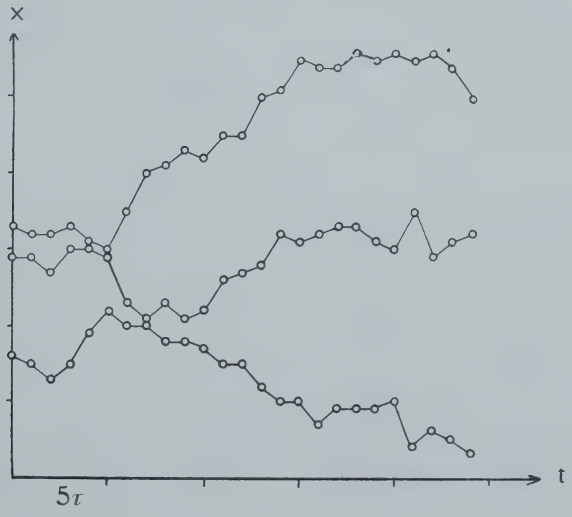
In der Tat zeigte die zweitgenannte Arbeit, in der einem Q_τ aus einer Beobachtungsreihe n_0, n_1, n_2 ... ein $Q_{2\tau}$ aus einer unabhängigen Beobachtungsreihe fortlaufender um 2τ entfernter Zählungen gegenübergestellt wurde usw., die Berechtigung der Annahme: der erwähnte Rechenausdruck ergab sich mit hinreichender Genauigkeit als konstant. Eine weitere theoretische Untersuchung des so als unzulässig erkannten bis dahin benutzten Auswertungsverfahrens aber wurde nicht an die komplizierteren Verhältnisse des ursprünglichen Problems, sondern an die rechnerisch einfacheren der linearen Brownschen Bewegung angeschlossen. Hierbei wird zu den Zeiten O, τ, 2τ ... die x-Koordinate eines Teilchens festgestellt, und die Wahrscheinlichkeit, die die Koppelung in der gewonnenen Reihe x_0, x_1, x_2 ... kennzeichnet, nämlich die Wahrscheinlichkeit, daß ein x_{i+1} auf ein x_i folge, ist nach vielfachen Erfahrungen einfach das Fehlergesetz $\frac{h_1}{\sqrt{\pi}} e^{-h_1^2 (x_{i+1} - x_i)^2}$ mit $h_1^2 = \frac{1}{4D\tau}$ (D Diffusionskonstante). Das mittlere Abstandsquadrat aufeinander-

folgender x-Werte ist dann bekanntlich $\overline{a_1^2} = \frac{1}{2\overline{h_1^2}} = 2D\tau$, und $\frac{\overline{a_1^2}}{\tau}$ ist eine Konstante, 2 D, die sich auch ergibt, wenn man aus einer unabhängig aufgestellten Beobachtungsreihe x_0', x_2', x_4' ... mit dem Zeitintervalle 2τ den entsprechenden Quotienten $\frac{\overline{a_2^2}}{2\tau}$ oder aus einer dritten Reihe x_0'', x_3'', x_6'' ... mit dreifachem Zeitintervall den Quotienten $\frac{\overline{a_3^2}}{3\tau}$ bildet. Wogegen nach Obigem zu erwarten wäre, daß die aus einer Reihe x_0, x_1, x_2 ... entnommenen derartigen Quotienten, eben wegen der Koppelung von Teilreihe zu Teilreihe, einen Gang zeigen. Zu dieser Frage werde nunmehr experimentelles Material beigebracht.

3. Zur Herstellung des untersuchten Sols wurden in 100 cm^3 Wasser 10^{-7} Mol selenige Säure gelöst und mit 10 Tropfen Hydrazinhydrat unter mäßigem Erwärmen auf dem Wasserbade versetzt. Dann wurde bei lebhaftem Schütteln der Kolben so lange erwärmt, bis sich das Sol gleichmäßig gebildet hatte. Die ultramikroskopische Einrichtung bestand aus einer Zeißschen Apparatur, deren Kardioidkondensor, Quarzkammer, Spezialobjektiv 60 (num. Ap. 1,0; Glyzerinimmersion) und Okular k20× von der Notgemeinschaft zur Verfügung gestellt worden waren. Im Okular befand sich eine Mikrometerplatte mit Strichen im Abstande von einem halben Millimeter, die durch das ganze Gesichtsfeld liefen. An ihr wurde nach den Schlägen eines geeichten Metronoms alle τ Sekunden unter Annahme einer senkrecht zur Strichrichtung gelegten x-Achse die jeweilige x-Koordinate des verfolgten Teilchens auf $^1/_{10}$ mm (im Okular) abgelesen. Diese $^1/_{10}$-Millimeter liegen als Längeneinheit den statistischen Reihen zugrunde.

Solche Reihen, meist im Umfange von 1200 Ablesungen, wurden in großer Zahl unter verschiedenen äußeren Verhältnissen aufgestellt. Als Beispiel sei etwa die Zahlenfolge (mit $\tau = 1{,}68''$)

96 95 93 95 99 102 100 100 98 98 97 95 95 92 90 87 89 89 90 84 86 85 83 80 ...



mitgeteilt. Die Figur gibt drei willkürlich herausgegriffene Reihen von je 25 Ablesungen. Die Abszisse Zeit ist in Abchnitte $5\tau = 5 \cdot 1{,}68''$, die Ordinate x in Abschnitte von 10 Einheiten geteilt. Die geraden Striche zwischen den Beobachtungspunkten sind tatsächlich ein wiederum vielfach unterteilter Linienzug.

Die Beantwortung unserer Frage wird jetzt aus Reihen wie den folgenden entnommen: die Tabelle, in ihrer ersten Hälfte aus 612, in ihrer zweiten aus 1200

	612 Ablesg. v. 16. 1. 29.		1200 Ablesg. v. 30. 1. 29.	
	$\overline{a^2_{n\tau}}$	$\overline{a^2_{n\tau}} / n\tau$	$\overline{a^2_{n\tau}}$	$\overline{a^2_{n\tau}} / n\tau$
1τ	6,94	6,94	6,28	6,28
2τ	13,55	6,77	12,22	6,11
3τ	20,31	6,77	18,78	6,26
4τ	29,60	7,40	23,15	5,79
6τ	48,68	8,11	32,45	5,41
12τ	103,63	8,64	56,6	4,72

aufeinanderfolgenden Ablesungen gewonnen (mit $\tau = 1{,}99''$, für die Tabelle gleich 1 gesetzt), zeigt für die Intervalle 1τ, 2τ, 3τ ... die mittleren Abstandsquadrate $\overline{a^2_{n\tau}}$, die z. B. für 2τ aus den Teilreihen $x_0, x_2, x_4 \ldots$; $x_1, x_3, x_5 \ldots$ und für die größeren Intervalle entsprechend gewonnen sind, und in der folgenden Zeile die Kombination $\frac{\overline{a^2_{n\tau}}}{n\tau}$. Im ersten Beispiel setzt nach anfänglicher Konstanz dieser Größe ein starker Gang nach aufwärts ein, im zweiten einer nach abwärts, so daß die Werte für 12τ schon fast um 100 % auseinandergerückt sind. Ausnahmslos wurde ein Gang festgestellt. Dadurch ist das übliche Auswertungsverfahren auch für den Fall der linearen Brownschen Bewegung durch den Versuch ad absurdum geführt.

4. Darüber hinaus ist darauf hinzuweisen, daß es auch schon unzulässig ist, zur Prüfung der Konstanz des $\frac{\overline{a^2_{n\tau}}}{n\tau}$ die Teilreihe $x_0, x_2, x_4 \ldots$ (ohne $x_1, x_3, x_5 \ldots$) usw. aus der gleichen anfänglichen Reihe herauszuheben. Möge z. B. die ursprüngliche Reihe das Verteilungsgesetz $\frac{h_1}{\sqrt{\pi}} e^{-h_1^2 a_1^2}$ befolgen und ihr gemitteltes Ab-

standsquadrat $\overline{a_1^2}$ tatsächlich $\frac{1}{2h_1^2}$ sein, so ist schon bei der angegebenen $2r$-Reihe allein infolge der Anordnung der a_1 zu erwarten, daß $\overline{a_2^2}$ nicht gleich $\frac{1}{2h_2^2} = \frac{2}{2h_1^2}$ ist. Um zwei extreme Fälle zu nennen: Wären die a_1 so angeordnet, daß auf jeden Schritt nach rechts ein gleicher nach links folgt, so wäre das mittlere Abstandsquadrat der Reihe x_0, x_2 ... offenbar Null. Folgten anderseits erst alle positiven Schritte aufeinander, dann alle negativen, während im übrigen ihre Anordnung dem Zufall überlassen wäre, so hätte man, wie man leicht nachrechnet, für $\overline{a_2^2}$ statt $\frac{2}{2h_1^2}$ den Wert $\frac{2}{2h_1^2}\left(1 + \frac{2}{\pi}\right)$ zu erwarten. In jedem Fall weicht $\frac{\overline{a_2^2}}{2\tau}$ von der erwarteten Konstanten 2D ab, und diese Abweichung pflanzt sich in die höheren Teilreihen, etwa $\frac{\overline{a_4^2}}{4\tau}$, $\frac{\overline{a_8^2}}{8\tau}$ usw., fort[6]).

5. Zum Schluß benutzen wir noch den zweifellos korrekten Teil unserer Mittelwertbildung, das aus einer besonders umfangreichen Reihe (von 3600 Ablesungen) gewonnene $\frac{\overline{a_1^2}}{1\tau}$, zu einer Bestimmung der Teilchengröße. In diesem Falle war $\tau = 1{,}99''$, die absolute Temperatur $T = 295°$, somit der innere Reibungskoeffizient des Dispersionsmittels Wasser $\eta = 0{,}00960$. $\overline{a_1^2}$ war in den oben genannten Einheiten 6,56; da aber jeder cm im Okular als $1{,}63 \cdot 10^{-2}$ cm im Objekt festgestellt wurde, ist unsere bisherige Einheit gleich $1{,}63 \cdot 10^{-4}$ cm und in Wirklichkeit

$$\overline{a_1^2} = 6{,}56 \cdot 1{,}63^2 \cdot 10^{-8} = 17{,}43 \cdot 10^{-8}, \quad \frac{\overline{a_1^2}}{\tau} = 8{,}76 \cdot 10^{-8},$$

also die Diffusionskonstante, nach Nr. 2 gleich der Hälfte dieses Wertes, $D = 4{,}38 \cdot 10^{-8}$.

Anderseits ist nach der Theorie

$$D = \frac{RT}{L} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r},$$

so daß sich mit der Gaskonstanten $R = 8{,}313 \cdot 10^7$ und der Loschmidtzahl $L = 6{,}061 \cdot 10^{23}$ der Partikelradius zu $r = 51\ \mu\mu$ berechnet, ein Wert, der wegen des Einflusses der eng benachbarten Kammerwände nach einer von Faxén[7]) abgeleiteten Korrektionsformel noch um einige $\mu\mu$ zu verkleinern ist und der gut mit dem nach anderen statistischen Methoden, z. B. aus der Größe Q (Nr. 2) oder aus Konzentrationsschwankungen am gleichen Sol ermittelten übereinstimmt.

Anmerkungen

1) Man vergleiche etwa die bereits 1922 gehaltene und im ersten Hefte des laufenden Jahrgangs der Naturwissenschaften abgedruckte Züricher Antrittsrede von Schrödinger.

2) E. Buchwald, Die Austrittswahrscheinlichkeit kolloidaler Teilchen und verwandte Begriffe. Ann. d. Phys. **66**, 1, 1921.

3) E. Buchwald, Über die Auswertung von statistischen Reihen mit Wahrscheinlichkeitsnachwirkung, in den „Problemen der modernen Physik", herausgeg. von P. Debye, Leipzig 1928.

4) A. Westgren, Die Veränderungsgeschwindigkeit der lokalen Teilchenkonzentration in kolloiden Systemen. Ark. f. Mat., Astron. och Fys., Svensk. Vet. Ak. **13**, Nr. 14, 1918.

5) a. a. O. (Ann. **66**) Seite 7.

6) Man vergleiche die Ausführungen im zweiten Teile der unter 3) genannten Note des Verfassers.

7) H. Faxén, Der Widerstand gegen die Bewegung einer starren Kugel in einer zähen Flüssigkeit, die zwischen zwei parallelen ebenen Wänden eingeschlossen ist. Ark. f. Mat., Astron. och Fys., Svensk. Vet. Ak. 19 A, Nr. 22, 1925.

Einiges über Tafeln zur Auflösung biquadratischer und kubischer Gleichungen und ihre Anwendung bei Schwingungsproblemen

Von Professor Dr. Alfred Kalähne

1. Die Berechnung der Schwingungszahlen (Eigenfrequenzen) und Dämpfungen eines frei schwingenden, aus zwei Teilsystemen zusammengesetzten gekoppelten Systems erfordert die Auflösung einer biquadratischen Gleichung mit reellen Koeffizienten, die als charakteristische oder determinierende Gleichung bezeichnet wird. Bei hinreichend kleiner Eigendämpfung der Systeme finden ausgesprochene Schwingungen statt. Die vier Wurzeln der biquadratischen Gleichung sind dann komplex, und zwar wegen der reellen Gleichungskoeffizienten paarweis konjugiert komplex, also von der Form $u_1 \pm iv_1$ und $u_2 \pm iv_2$, wobei $i = \sqrt{-1}$ die imaginäre Einheit ist; v_1 und v_2 sind positive reelle Zahlen, die die zyklische oder Kreisfrequenz, d. h. die Schwingungszahl in der Zeit 2π Sekunden der beiden Kopplungsschwingungen angeben. u_1 und u_2, bei frei abklingenden gedämpften Schwingungen negative reelle Größen, sind die Dämpfungskonstanten. Die Frequenzen v_1 und v_2 können im Falle stärkerer Dämpfung beide oder jede einzeln gleich Null und bei noch stärkerer Dämpfung imaginär werden, wobei die Produkte iv_1 und iv_2 dann reelle Werte erhalten. Die Schwingung geht dabei in eine einfache aperiodische Bewegung über, und die Wurzeln der charakteristischen biquadratischen Gleichung nehmen die reelle Form an $u_1 \pm v_1$, $u_2 \pm v_2$, wo v_1 und v_2 reelle Größen sind. In jedem Falle haben die vier Wurzeln die angegebene, aus je einem reellen Vorderglied und einem reellen oder imaginären Hinterglied bestehende Form, gerade so wie die Wurzeln einer quadratischen Gleichung.

Schwingungssysteme der angeführten Art gibt es sowohl auf elektrischem als auf mechanischem und anderen Gebieten, und wenn ihre Frequenzen und Dämpfungen aus den physikalischen Daten, wie Induktivität (Selbstinduktion), Kapazität usw. hergeleitet werden sollen, so steht man immer vor den rechnerischen Schwierigkeiten, welche die höheren algebraischen Gleichungen bieten, von denen die biquadratische ein noch verhältnismäßig einfacher Fall ist. Auch andere als Schwingungsprobleme führen auf derartige (biquadratische oder kubische) Gleichungen, und es ist daher nicht ohne Wert, einfache Hilfsmittel zur schnellen, wenn auch nicht sehr genauen Bestimmung der Zahlenwerte ihrer Wurzeln zu haben. Das einfachste bietet sich immer in der Aufstellung einer Tabelle, aus der die gesuchten Werte entnommen werden können. Denn die Rechenverfahren zur zahlenmäßigen Berechnung der Wurzeln algebraischer Gleichungen sind recht umständlich, und ganz besonders ist die Auffindung genügend genauer erster Näherungswerte zuweilen sehr beschwerlich. Diese Mühe kann durch ein Tabellenwerk wesentlich erleichtert werden.

Eine solche Tabelle habe ich zunächst für Radioarbeiten im photophysikalischen Laboratorium der hiesigen Technischen Hochschule berechnet und sie dann auch für andere Zwecke erweitert und ergänzt.

2. Auf den ersten Blick scheint die Aufstellung derartiger Tabellen schon für die biquadratische Gleichung aussichtslos, da diese Gleichung in der vollen Form

$$z^4 + a_3 z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0 \qquad (1)$$

vier Koeffizienten a_0, a_1, a_2, a_3 enthält, die ebenso wie ihre vier Wurzeln je vier voneinander unabhängige Einzelwerte sind. Nur zwei von ihnen können aber jeweils in der flächenhaften Anordnung einer Tabelle auf jeder Seite derselben als Eingangswerte — einer für die Spalten, einer für die Zeilen — benutzt werden. Jede dieser Einzeltabellen muß für verschiedene Werte der dritten Eingangsvariablen wiederholt werden und das Ganze dann ebenso für die vierte Variable. Also könnten beispielsweise a_0 und a_1 die Eingangsvariablen jeder Tabellenseite sein, a_2 wäre auf jeder Seite konstant und würde von Seite zu Seite sich in geeigneten Stufen ändern; als vierte Variable bliebe dann a_3. Diese vierte Variable läßt sich aber ebenso wie das vierte Element bei den Wurzeln durch Übergang zu der verkürzten oder defekten (reduzierten) Gleichung

$$x^4 + a x^2 + b x + c = 0 \qquad (2)$$

mittels der Transformation

$$z = x - \frac{a_3}{4} \qquad (3)$$

beseitigen, so daß eine wesentliche Schwierigkeit wegfällt, die in allzu großem Umfang der Tabelle bestehen würde.

3. Das nächstliegende wäre nun offenbar, die drei Koeffizienten a, b, c der Gleichung (2) als Eingangsvariable zu wählen und die Wurzeln als die gesuchten Tabellenwerte einzutragen. Diese Wurzeln nehmen hier auch vereinfachte Form an, nämlich:

$$\left.\begin{array}{l} \left.\begin{matrix} x_1 \\ x_3 \end{matrix}\right\} = u \pm i v_1 \text{ und } \left.\begin{matrix} x_2 \\ x_4 \end{matrix}\right\} = -u \pm i v_2 \\ \text{bzw.} \\ \left.\begin{matrix} x_1 \\ x_3 \end{matrix}\right\} = u \pm v_1 \text{ und } \left.\begin{matrix} x_2 \\ x_4 \end{matrix}\right\} = -u \pm v_2, \end{array}\right\} \qquad (4)$$

enthalten also auch nur drei unabhängige Elemente u, v_1, v_2 bzw. u, v_1, v_2, indem das Vorderglied bei allen vier Wurzeln denselben Zahlenwert erhält. Die Berechnung einer Tabelle in dieser Anordnung ist aber sehr unbequem, und der erforderliche Arbeitsaufwand dürfte in keinem Verhältnis zu dem erzielten Vorteil größerer Bequemlichkeit bei der Benutzung stehen, zumal da ja die Tabellen nur erste Näherungswerte als Grundlage für genauere Berechnung liefern sollen.

Richtiger ist es daher, den umgekehrten Weg einzuschlagen. Die von mir berechneten Tabellen haben die Wurzeln x_1, x_2, x_3, x_4 in der Form der Gleichung (4) als Eingangswerte und enthalten als Tabellenwerte die Koeffizienten a, b, c der verkürzten biquadratischen Gleichung (2). Sie sind also eigentlich Tabellen zur

Auffindung dieser Koeffizienten, deren Werte sie genau angeben. Die Benutzung in der uns hauptsächlich interessierenden umgekehrten Richtung zur Auffindung der Wurzeln aus den Koeffizientenwerten ist zwar weniger einfach; sie erfordert etwas Suchen und Überlegung bei der Abschätzung der dem wahren Wert am nächsten kommenden Dezimalen der Wurzeln. Dafür lassen sich aber die Tabellen einfach und mit geringer Arbeit zuverlässig berechnen und leicht auf ihre Richtigkeit prüfen.

4. Die Gesamtanordnung in vier Teiltafeln I bis IV ergibt sich aus den verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der vier Wurzeln, die entweder alle vier komplex sind (Tafel I) oder alle vier reell (Tafel II), oder aber teils reell, teils komplex (Tafeln III und IV). Wegen der Reellität der Koeffizienten a, b, c, die hier vorausgesetzt wird, sind komplexe Wurzeln immer paarweise vorhanden. Die Tafeln III und IV unterscheiden sich voneinander dadurch, daß in III die komplexen Wurzeln positives, die reellen negatives Vorderglied haben, während es in IV umgekehrt ist.

Die Tafeln sind zunächst in kleinem Umfange berechnet worden, und zwar für Werte des Vordergliedes u von 0 bis 10, in Stufen von je einer vollen Einheit ansteigend, also für $u = 0$, $u = 1$, $u = 2$ . . . bis $u = 10$. Dasselbe gilt für die Hinterglieder v_1 und v_2 bzw. die reellen Faktoren v_1 und v_2 der imaginären Hinterglieder. Das so umgrenzte Gebiet der berücksichtigten Wurzelwerte umfaßt in der komplexen Zahlenebene bei vier komplexen Wurzeln (Tafel I) das um den Nullpunkt symmetrisch liegende Quadrat mit den Eckpunkten $-10+10\,i$, $-10-10\,i$, $+10+10\,i$, $+10-10\,i$ mit im ganzen 441 Punkten, von denen jeder einer Wurzel entspricht, einschließlich der auf der reellen und der imaginären Achse liegenden Punkte. Bei vier reellen Wurzeln (Tafel II) umfaßt es mit ebensovielen Einzelwerten das Intervall von $-10-10=-20$ bis $+10+10=+20$ auf der reellen Achse, innerhalb dessen also alle vier Wurzeln liegen müssen, damit die Tafel II auf die vorgelegte Gleichung ohne weiteres anwendbar ist. Eine Erweiterungsmöglichkeit durch geeignete Variablentransformation für sämtliche Tafeln wird weiter unten besprochen werden. Bei den Tafeln III und IV besteht das Gebiet jeweils aus einer der beiden reellen Strecken von -20 bis 0 oder von 0 bis $+20$ und der danebenliegenden rechteckigen Hälfte des komplexen Quadrates von Tafel I. Umfang und Form der umgrenzten, von den Tabellen umfaßten Wurzelgebiete bleiben dieselben für alle unendlich vielen vollständigen biquadratischen Gleichungen mit reellen Koeffizienten, die mittels der Transformationsgleichung (3) in ein und dieselbe verkürzte Gleichung (2) übergehen. Nur ist der Schwerpunkt (Symmetriemittelpunkt des Gebietes um die Strecke $\frac{a_3}{4}$ nach der negativen Seite hin auf der reellen Achse verschoben, bei negativem a_3 nach der positiven Seite hin.

5. Bei diesem Grade der Ausgestaltung umfaßt die ganze Tabelle acht Druckseiten in Quartformat oder sechzehn Oktavseiten; sie bildet also ein sehr handliches Rechenmittel. Für genaueres Arbeiten muß sie erweitert werden, teils durch

Verkleinerung und Vermehrung der Stufen der Eingangsvariablen u, v_1 . . . usw., die zweckmäßig auf halbe statt ganzer Einheiten verkleinert werden, teils durch Erweiterung der berücksichtigten Wurzelgebiete über den Wert 10 für die Eingangsvariablen hinaus, wobei dann zum Teil größere Stufen für diese benutzt werden können. Zur ersten Orientierung aber wird zweckmäßig immer die Tabelle in dem bisherigen Umfange benutzt werden.

Der Mangel, der in zu kleinem Umfang des Wurzelgebietes dieser Tabelle liegt, so daß Gleichungen, deren Wurzeln außerhalb desselben liegen, scheinbar nicht mit behandelt werden können, läßt sich übrigens grundsätzlich ohne Erweiterung der Tabelle beseitigen. Das geschieht durch geeignete Transformation einer solchen Gleichung mittels Einführung neuer Variablen, die ein passendes Vielfaches der ursprünglichen Variablen z oder x sind. Dadurch gelingt es immer, die Koeffizienten und damit auch die Wurzeln in die vorhandenen Gebiete der Tabelle hineinzubringen. Nur wird die Genauigkeit der Wurzelbestimmung zum Teil etwas kleiner.

6. Die Tabellen umfassen auch die kubischen Gleichungen, ebenfalls in ihrer verkürzten Form, also mit fehlendem quadratischen Gliede. Ihre Wurzeln sind entweder alle drei reell oder zwei von ihnen sind konjugiert komplex. In der Tabelle sind es die besonderen Wurzeln, bei denen ein reelles Hinterglied v_1 oder v_2 gleich dem Vordergliede u ist. Die eine der Wurzeln wird dann gleich Null, und die biquadratische Gleichung geht in eine kubische über. Ihre Wurzeln haben also immer die Form

$$\left.\begin{matrix} x_1 \\ x_3 \end{matrix}\right\} = u \pm v \quad \text{und} \quad x_2 = -2u \tag{5}$$

wobei u positiv oder negativ sein kann und v reell oder rein imaginär ist. Sie sind alle in den Tafeln II bis IV enthalten, und zwar an den Stellen, wo das konstante Glied c der biquadratischen Gleichung Null ist. Die Teiltabelle für kubische Gleichungen läßt sich leicht ausziehen; sie umfaßt hier nur eine Seite.

Wird noch das Vorderglied u gleich Null, so kommt man natürlich zur einfachen quadratischen Gleichung.

7. Zwar fehlt hier der Raum, die ganze Tabelle abzudrucken, aber ein kleiner Ausschnitt aus Tafel I möge Platz finden, um daran zugleich die Anwendung der Tabelle an einem Beispiel zu zeigen.

Zwei annähernd aufeinander abgestimmte elektrische Schwingungskreise (durch die Kennziffern 1 und 2 unterschieden) werden kapazitiv durch einen gemeinsamen größeren Kondensator C_{12} gekoppelt. Jeder Kreis enthält für sich noch einen eigenen Kondensator C'_1 und C'_2 in Reihe mit dem Kopplungskondensator, außerdem Induktivität L_1 und L_2, sowie Ohmschen Widerstand R_1 und R_2. Die Zahlenwerte sind: $L_1 = 10^{-5}$ Henry $= 10\,000$ cm el. magn., $L_2 = 5 \times 10^{-6}$ Henry $= 5000$ cm, $R_1 = 2{,}80$ Ohm $= 2{,}80 \times 10^9$ cm/sec el. magn., $R_2 = 8{,}00$ Ohm $= 8{,}00 \times 10^9$ cm/sec, $C'_1 = 0{,}001247\ \mu$ F $= 1122$ cm el. stat., $C'_2 = 0{,}002726\ \mu$ F $= 2383$ cm el. stat. Die für jeden der Kreise wirksame Kapazität C_1 und C_2 ergibt sich daraus zu $C_1 = 0{,}001202\ \mu$ F $= 1080$ cm el. stat. und $C_2 = 0{,}002450\ \mu$ F $= 2205$ cm el. stat. Als Zahlenwerte der Schwingungskonstanten erhält man damit

aus den bekannten Formeln $n^2 = \frac{1}{LC}$, $\delta = \frac{R}{2L}$, $K^2 = \frac{C_1 C_2}{C_{12}^2}$ die Kreisfrequenzen ohne Dämpfung $n_1 = 9{,}12 \times 10^6$, $n_2 = 9{,}03 \times 10^6$, die sekundlichen Schwingungszahlen $N_1 = 1{,}45 \times 10^6$, $N_2 = 1{,}42 \times 10^6$, die Dämpfungskonstanten $\delta_1 = 0{,}140 \times 10^6$, $\delta_2 = 0{,}800 \times 10^6$, und den Kopplungskoeffizienten $K = 0{,}0538$. Die Kopplung beträgt also etwas über fünf Hundertel, die Dämpfungen sind ziemlich groß. Die Wellenlängen werden $\lambda_1 = 206$ m, $\lambda_2 = 208$ m.

Die charakteristische Gleichung für die in der komplexen Größe $\mu = -\delta' \pm i\nu'$ zusammengefaßten Dämpfungen und Frequenzen der Koppelschwingungen wird

$$\mu^4 + 1{,}88 \times 10^6 \mu^3 + 165{,}2 \times 10^{12} \mu^2 + 155{,}9 \times 10^{18} \mu + 6767{,}3 \times 10^{24} = 0 \qquad (6)$$

Sie ist bereits so geschrieben, mit den Zehnerpotenzen als Faktoren, daß eine einfache Transformation diese beseitigt, indem man $\mu = 10^6 \bar{\mu}$ setzt, wodurch die Gleichung unter Weglassung des Faktors 10^{24} wird

$$\bar{\mu}^4 + 1{,}88\ \bar{\mu}^3 + 165{,}2\ \bar{\mu}^2 + 155{,}9\ \bar{\mu} + 6767{,}3 = 0. \qquad (7)$$

Setzt man nun

$$\bar{\mu} = x - \frac{a_3}{4} = x - 0{,}47, \qquad (8)$$

so bekommt man die verkürzte mit unserer Tabelle zu behandelnde Gleichung

$$x^4 + 163{,}9\ x^2 + 1{,}416\ x + 6730 = 0. \qquad (9)$$

$u \pm \nu_1 i = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} x_2 \\ x_4 \end{Bmatrix} = -u \pm 9i, \nu_2 = 9$		
	a	b	c
0 ± 0	81	0	0
1 i	82	0	81
2 i	85	0	324
3 i	90	0	729
u 4 i	97	0	1296
= 5 i	106	0	2025
6 i	117	0	2916
0 7 i	130	0	3969
8 i	145	0	5184
9 i	162	0	6561
10 i	181	0	8100
1 ± 0	79	−162	82
1 i	80	−160	164
2 i	83	−154	410
3 i	88	−144	820
u 4 i	95	−130	1394
= 5 i	104	−112	2132
6 i	115	− 90	3034
1 7 i	128	− 64	4100
8 i	143	− 34	5330
9 i	160	0	6724
10 i	179	+ 38	8282

8. Durchsicht der Tafeln zeigt, daß in Tafel I die hierneben abgedruckten Einzeltabellen in Betracht kommen. Auch die benachbarten Einzeltabellen sind zu berücksichtigen; im allgemeinen müssen je vier zusammenliegende Tabellen zu Hilfe genommen und die Wurzelwerte daraus schätzungsweise herausgesucht werden. Hier beschränkt sich das Gebiet zufällig auf zwei. Man sieht, daß ν_1 und ν_2 beide dicht bei dem Werte 9 liegen müssen. Die Wahl für den reellen Teil u (die Dämpfungskonstante) ist schwieriger und gibt ein weniger genaues Ergebnis. Man kann hier sogar zunächst im Zweifel sein, ob u näher an 0 oder an 1 liegt. Man wird es versuchsweise gleich 0,5 annehmen können. Überlegungen über den Gang der Zahlenreihen der Tabelle, die hier zu weit führen würden, zeigen, daß u näher an Null liegen muß. Die genauen Werte, die man weiter mit Näherungsmethoden findet, sind

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{Bmatrix} = 0{,}23 \pm 9{,}14\,i \qquad \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_4 \end{Bmatrix} = -0{,}23 \pm 8{,}97\,i \qquad (10)$$

Die gesuchten Dämpfungen δ'_1 und δ'_2 selbst sind die negativen Werte der Vorderglieder $-u_1$ und $-u_2$ der Wurzeln der vollständigen Gleichung; aus Gleichung (8) und (10) findet man nun:

$$\left.\begin{matrix}\bar{\mu}_1\\ \mu_3\end{matrix}\right\} = -0{,}24 \pm 9{,}14\,i \qquad \left.\begin{matrix}\bar{\mu}_2\\ \mu_4\end{matrix}\right\} = -0{,}70 \pm 8{,}97\,i \tag{11}$$

Durch Multiplikation mit 10^6 gelangt man schließlich von $\bar{\mu}$ zu μ und damit zu den endgültigen Werten der Dämpfungen und Kreisfrequenzen der Koppelschwingungen $\delta'_1 = 0{,}24 \times 10^6$, $\delta'_2 = 0{,}70 \times 10^6$, $\nu'_1 = 9{,}14 \times 10^6$, $\nu'_2 = 8{,}97 \times 10^6$, diese vier Werte alle in reziproken Sekunden (sec $^{-1}$) gemessen.

In dem gewählten Beispiel unterscheiden sich die Werte der gekoppelten Schwingungsgrößen nur wenig von den ungekoppelten, und da diese letzteren bekannt oder mit Vernachlässigung der Kopplung — und nötigenfalls auch der Dämpfung — leicht zu berechnen sind, so erhält man die ersten Näherungswerte für weitere Rechnungen gewöhnlich auf diesem Wege. Anders ist es natürlich, wenn nur die biquadratische oder kubische Gleichung vorliegt ohne Rücksicht auf ihre Herkunft. Dann fehlen zunächst Näherungswerte, und in solchen Fällen erweist sich die Tabelle besonders nützlich.

Das Beispiel ist so gewählt, daß es die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Tabelle im gegenwärtigen Zustand zeigt. Um das die Dämpfung ergebende reelle Vorderglied genauer zu bekommen, müßte man die früher erwähnte Erweiterung der Tabelle durchführen.

Im allgemeinen muß vor Benutzung der Tabelle noch aus den Vorzeichen der einzelnen Glieder der vorgelegten Gleichung und dem Vorzeichen ihrer Diskriminante festgestellt werden, ob die Wurzeln reell oder komplex oder teilweise reell, teilweise komplex sind, damit man dann in der richtigen Tafel suchen kann. Bei dem obigen Beispiel war dies nicht nötig, da seine physikalischen Konstanten offenbar Schwingungen, also vier komplexe Wurzeln ergeben.

Widerstände der laminaren und turbulenten Strömung

Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr.-Ing. E. h. Dr. phil. Hans Lorenz

I. Die in der Natur vorkommenden und für technische Zwecke verfügbaren Flüssigkeiten und Gase widerstreben im Gegensatz zu den sog. idealen Flüssigkeiten der theoretischen Hydrodynamik einer gegenseitigen Verschiebung ihrer Teile durch eine Schubspannung, die, wie schon Newton (1687) erkannte, mit dem Geschwindigkeitsgefälle senkrecht zur Bewegungsrichtung wächst und außerdem von der Körperbeschaffenheit abhängig ist. Die Ursache dieser inneren Reibung oder Zähigkeit ist nach der kinetischen Auffassung in der Querbewegung kleinster Teile zu suchen, die einen Austausch von Bewegungsgröße und deren teilweise Vernichtung, d. h. Umwandlung von Stromenergie in Wärme bedingt. Weiterhin haften diese zähen Flüssigkeiten an festen mit ihnen in Berührung stehenden Oberflächen, wodurch in bewegten Flüssigkeiten die oben erwähnten gegenseitigen Verschiebungen in der Nachbarschaft solcher Oberflächen geradezu hervorgerufen werden. Daher kommt es, daß die in einem um die Vertikalachse gedrehten Eimer anfänglich ruhende Flüssigkeit nach und nach mitgenommen wird und schließlich nach Zerstörung der relativen Verschiebungen durch die Zähigkeit wie ein mit dem Gefäß starr verbundener Körper rotiert. Die Verschiebungen, die man wohl auch als Elementarwirbel bezeichnet, verschwinden immer dann, wenn ihre Ursache, die relative Bewegung einer festen Körperoberfläche gegen die Flüssigkeit aufgehört hat. Alsdann stellt sich in dieser eine wirbelfreie, sog. Potentialbewegung ein, bei der im Falle der Drehung um eine Achse das Produkt der Umlaufsgeschwindigkeit mit dem Achsenabstand, wie beim zweiten Keplerschen Gesetz der Planetenbewegung, seinen Wert behält. Ein Beispiel hierfür bilden die bekannten Strudel in Flüssen in der Nähe von Hindernissen, welche in Wirklichkeit aus einem wie ein starrer Zylinder rotierenden Kern und einer wirbelfrei mit nach außen abnehmender Geschwindigkeit umlaufenden Flüssigkeit bestehen.

Wirkt die Ursache der Elementarwirbel fort, so ist zur Aufrechterhaltung der Strömung ein Druckgefälle notwendig, das in zylindrischen Röhren nach einer von F. Neumann (1860) aufgestellten Theorie im Verhältnis der mittleren Stromgeschwindigkeit und mit dem Kehrwert des Querschnittes wächst, während die Geschwindigkeit über diesen eine parabolische Verteilung mit dem Scheitel in der Rohrachse aufweist. Diese Folgerungen werden von der Erfahrung (Poiseuille 1844) durchaus bestätigt und dienen zur Messung der Zähigkeit. Zwischen parallelen festen Wänden herrschen ganz ähnliche Beziehungen, während beim Verschieben einer Wand gegen eine parallele feste die Geschwindigkeitsverteilung linear und der aus der Schubspannung am Rande hervorgehende Verschiebungswiderstand mit der Relativgeschwindigkeit der Wände und dem Kehrwerte des Abstandes wächst. Sind die Flächen gegeneinander leicht geneigt, wie der exzentrische Zapfen in einem geschmierten Lager, so tritt eine Verbindung beider Bewegungsformen unter gleich-

zeitiger Wirkung eines periodischen Druckgefälles in der Ölschicht und eines Schubspannungsmomentes am Zapfenumfang ein, worauf die Sommerfeldsche Theorie der Lagerschmierung (1904) beruht. Diese weist allerdings wohl wegen des noch nicht hinreichend geklärten Öldurchflusses Unstimmigkeiten gegen die Erfahrung auf, welche zu Abänderungen von Gümbel und Duffing geführt haben. Hierher gehört auch die äußerst langsame Bewegung sehr kleiner Kugeln, sog. Suspensionen, in zähen Flüssigkeiten, deren Widerstand nach einer von Stokes aufgestellten Formel mit der Geschwindigkeit und dem Kugeldurchmesser, bzw. für anders gestaltete Drehkörper mit einer der linearen Abmessungen und dem Verhältnis zur anderen wächst. Die lineare Abhängigkeit des Widerstandes von der Geschwindigkeit ist demnach eine ganz allgemeine, erfahrungsmäßig bestätigte Folgerung der langsamen, sog. laminaren Relativbewegung fester Körper gegen zähe Flüssigkeiten und spielt als sog. Dämpfung eine große Rolle in zahlreichen Schwingungsvorgängen.

II. Schon seit Newton kannte man die Erfahrungstatsache, daß der Bewegungswiderstand rascher Strömungen, z. B. in Flüssen, mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst und stellte auch bald die Zunahme mit dem Kehrwert einer linearen Querschnittsabmessung fest, für die man unter dem Namen des hydraulischen Radius das Verhältnis des Querschnittes zum benetzten Umfang wählte. Der Festwert in diesem Ansatz erwies sich im Gegensatz zur Zähigkeit merklich unabhängig von den Flüssigkeitseigenschaften und wurde darum der Rauhigkeit der festen Begrenzung zugeschrieben, und gelegentlich auch als solche bezeichnet. Wenn man auch einsah, daß es sich hierbei um Vernichtung von Strömungswucht handelte, die bei den oben besprochenen langsamen Bewegungen vernachlässigt werden konnte, so fehlte doch bis in die Gegenwart eine Begründung des quadratischen Widerstandsgesetzes sowie der Anschluß an die laminare Strömung. Im Bereiche des Übergangs begnügte man sich nach Prony (1804) und Hagen (1859) mit der linearen Verbindung der beiden Ausdrücke zu einer zweigliedrigen Formel oder nach Woltman (1790) mit einer eingliedrigen Potenzformel, die neuerdings wieder von Blasius (1912) aufgegriffen wurde. Mit solchen rein empirischen Ansätzen war natürlich wissenschaftlich nichts gewonnen, da die Festwerte, insbesondere aber die gewählten Exponenten der Geschwindigkeit und des hydraulischen Radius physikalisch nicht gedeutet werden konnten. Solche Formeln wenden die Hydrauliker auch heute noch auf alle möglichen Strömungsvorgänge an, wobei es ihnen für die Wassermessung besonders auf die von zufälligen Eintrittsstörungen bedingte, im allgemeinen aber flache Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt mit starkem Randgefälle ankommt, während die wissenschaftliche Aufklärung völlig zurücktritt.

Eine Neubelebung erfuhr dieses von der theoretischen Hydrodynamik bislang völlig ignorierte Forschungsgebiet durch die Feststellung der kritischen Geschwindigkeit beim Übergang von der laminaren zu der sog. turbulenten Strömung durch O. Reynolds (1883) unter gleichzeitiger Ausschaltung der Abmessungen der Vorrichtung durch reine Zahlenwerte auf Grund der Ähnlichkeitsbeziehung. Die Reynoldsschen Versuche mit gefärbten Stromfäden zeigten in Übereinstimmung mit früheren von Hagen an mitgeführten Pulvern durch regel-

lose Trübung deutlich einen Mischungsvorgang beim Eintritt der Turbulenz an, so daß die gemessenen Drücke und Geschwindigkeiten als zeitlich-örtliche Mittelwerte aufzufassen waren. Solche führt auch Reynolds selbst unter Hinzunahme von Schwankungsgliedern in die allgemeinen Navier-Stokesschen Bewegungsgleichungen für zähe Flüssigkeiten ein, ohne aber damit bis zur Aufstellung des Widerstandsgesetzes für die Turbulenz oder zur offenbaren Instabilität der Laminarbewegung im kritischen Zustand zu gelangen. Dasselbe gilt von einer umfassenden Untersuchung von H. A. Lorentz (1897), die auf Grund bestimmter Annahmen über Wirbelformen viel zu kleine Werte der kritischen Geschwindigkeit ergab. Daß periodische Schwankungen nicht zum Ziele führten, hatte schon Raileigh (1895) bewiesen, trotzdem wurden aber die Versuche der Transformation der Navier-Stokesschen Gleichungen bis in die neueste Zeit immer mit negativen Ergebnissen fortgesetzt und z. B. von Oseen (1928) und seiner Schule auf den Widerstand fester Körper in zähen Flüssigkeiten ausgedehnt. Dabei liegt der Grund des Versagens dieses Verfahrens ganz nahe; nämlich in den durch die Rauhigkeit der festen Wände, d. h. durch zahlreiche, unregelmäßig verteilte Unstetigkeiten mathematisch nicht genau definierten Randbedingungen im Gegensatz zur Laminarströmung, bei der die Unebenheiten einfach überdeckt werden.

Einen Ausweg aus diesen Schwierigkeiten versprach die von Prandtl (1904) auf Grund unbefangener Beobachtungen für Flüssigkeiten mit geringer bzw. verschwindender Zähigkeit eingeführte Grenzschicht, in die das Geschwindigkeitsgefälle gegen die feste Wand verlegt werden konnte, während außerhalb derselben eine Potentialströmung herrscht. Da diese wirbelnde Grenzschicht bei scharfer Krümmung, also an Kanten sich in ganze Wirbelballen auflöst, so konnte v. Kármán (1911) unter Anwendung des Biot-Savartschen Gesetzes für die Wirkung solcher Gebilde auf die Umgebung die periodische Entstehung und wechselseitige Anordnung der hinter den Kanten einer unendlich langen Platte im Strom langsamer fließenden Wirbelstraße im Einklang mit der Erfahrung mathematisch aufklären, womit man das Problem der Turbulenz anfänglich für gelöst hielt. Indessen zeigte sich bald, daß diese Lösung zwar für geordnete Vorgänge, z. B. für Hieb- und Schneidentöne, sowie für das Rauschen der Baumblätter nach Krüger galt, nicht aber für die turbulente, d. h. ganz unregelmäßige Wirbelbildung an den Rauhigkeiten einer festen Wand. Prandtl und seine Schule griffen daher, nachdem die Annahme einer parabolischen Geschwindigkeitszunahme in der Grenzschicht durch Schiller (1922) nicht zum Ziele geführt hatte, auf ein durch die Erfahrung einigermaßen gestütztes Potenzgesetz für die Geschwindigkeitsverteilung im Gesamtquerschnitt zurück und versuchten dasselbe mit demjenigen von Woltman-Blasius für das Druckgefälle in Einklang zu bringen. Dies entsprach unter Aufgabe der Grenzschicht ganz den rein empirischen Methoden der Hydraulik, deren Vertreter Krey (1927) jedoch gegen die hieraus hervorgehende Geschwindigkeitskurve mit einer Spitze in der Stromachse zugunsten einer versuchsmäßig besser zutreffenden logarithmischen Kurve Einspruch erhob.

III. Trotzdem bietet, wenn man zunächst die Geschwindigkeitsverteilung zurückstellt, die Grenzschicht den Schlüssel zur Lösung des Problems. Setzt man ihre Dicke im Falle der vollendeten Turbulenz gleich der mittleren Höhe

der Wandrauhigkeit, die sich dann als mittlere Steigerung der Unebenheiten ergibt, so folgt zunächst der rein quadratische turbulente Reibungswiderstand ebener Platten in Übereinstimmung mit neuen Versuchen von Kempf (1927), weiter das entsprechende Druckgefälle in Rohren mit dem vierfachen Beiwert und schließlich, was unabhängig vom Verfasser auch van Iterson (1926) zeigte, der lineare Zusammenhang der Wandrauhigkeit mit dem Beiwert des turbulenten Wärmeüberganges zwischen der Wand und einer strömenden Flüssigkeit, womit dessen langgesuchte Abhängigkeit von der Stromgeschwindigkeit gegeben ist. Setzt man ferner das Verhältnis der mittleren Stromgeschwindigkeit in einem Rohr oder zwischen zwei Platten zu derjenigen des Kernstroms als Reihe mit fortschreitenden Potenzen der Verhältnisse der Grenzschichtdicke zum Stromhalbmesser an, so folgt für gleiche Druckgefälle im ganzen Querschnitt der allgemeine Verlauf der Widerstandskurve bzw. die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwerts des Geschwindigkeitsquadrats von der Reynoldsschen Zahl und der Wandrauhigkeit in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung. Die Kurve trennt sich bei der kritischen Zahl steil von der laminaren Geraden und nähert sich asymptotisch dem Grenzzustande der von der Wandrauhigkeit allein abhängigen reinen Turbulenz. Die kritische Zahl selbst gewinnt man durch das der Instabilität entsprechende Energiekriterium beim Übergang in völligem Einklang mit den neuesten zuverlässigen Messungen. Für diesen Grenzfall ist auch die Geschwindigkeitsverteilung festgelegt, die sonst wegen des Herausfallens der Grenzschichtdicke und Kerngeschwindigkeit, also der nicht unmittelbar meßbaren Größen, deren Produkt übrigens im turbulenten Zustande konstant ist, unbestimmt bleibt.

Haben wir es mit einer Stromerweiterung zu tun, so bildet sich an der Wand, in deren Nachbarschaft die Geschwindigkeit dem Druckgefälle folgt, eine rückläufige Wirbelschicht, deren Mischung mit dem Kernstrom die Vernichtung der radialen Bewegungsgröße der Strömung zufolge hat. Daraus berechnet sich unter Hinzunahme der turbulenten Wandreibung leicht der gegenüber der Stromverengung in Düsen sehr ungünstige Wirkungsgrad der sog. Diffusoren. Derselbe Vorgang spielt sich auch auf der Rückseite eines umströmten festen Körpers in dessen sog. Wirbelschwanz ab; und darum führt auch hier die Vernichtung der radialen Bewegungsgröße zum Ziel, d. h. zur Berechnung des Widerstandsbeiwertes ohne Zuhilfenahme irgendwelcher Erfahrungszahlen in guter Übereinstimmung mit Versuchen. Die starke Zunahme dieses Beiwertes beim Überschreiten der Wellengeschwindigkeit bei Schiffen und Geschossen war schon 1917 als Resonanzerscheinung erkannt, woraus sich die in der Formel auftretenden Festwerte zahlenmäßig ergaben.

In einem Rohrkrümmer strebt die Flüssigkeit die eingangs erwähnte Potentialströmung an, die allerdings nur in einem vollen Kreisring erreichbar ist, im Krümmer aber die Aufteilung des Stromes in aufeinanderfolgende Erweiterungen und Verengungen bedingt, welche durch Randwirbelschichten erkennbar sind. Dazu tritt als Folge der Fliehkraft eine Druckzunahme nach außen, die ihrerseits einen Querschnitts-Doppelwirbel hervorruft, dessen für die Strömung verlorene Energie den Druckverlust im Krümmer ohne Hinzunahme von Erfahrungswerten bestimmt

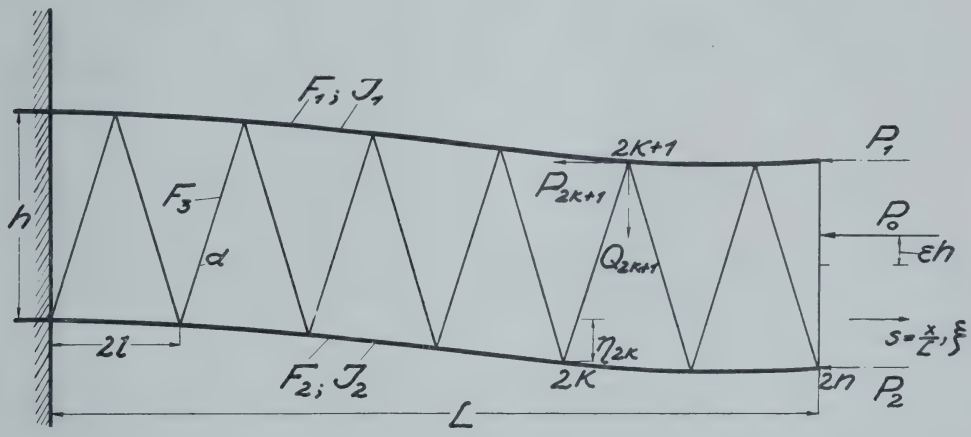
und im Verein mit der turbulenten Wandreibung ein günstigstes, durch Versuche bestätigtes Verhältnis des Rohrhalbmessers zum Krümmungsradius ergibt. Mit diesen Darlegungen dürfte die Möglichkeit des Ersatzes der immer nur für Einzelfälle gültigen hydraulischen Koeffizienten durch die Analyse der Vorgänge selbst allgemein erwiesen sein.

Literatur: Zusammenfassend für Versuchsergebnisse: L. Hopf: „Zähe Füssigkeiten", im Handbuch der Physik von Geiger und Scheel, Bd. VII, 1927,
und für Theorie: H. Lorenz: „Strömung und Turbulenz", im Handbuch der phys. und techn. Mechanik von Auerbach und Hort, Bd. VII, sowie desselben Verfassers Abhandlungen in der Physikalischen Zeitschrift 1917 und 1925 bis 1929.

Zur Berechnung der Gegliederten Druckstäbe

Von Prof. Dr. E. Pohlhausen

Der in der Figur dargestellte Träger hat biegungsfeste parallele Gurtungen, die links eingespannt sind. F_1, F_2 und J_1, J_2 bezeichnen die Querschnitte bzw. Trägheitsmomente der Gurte. Die Gitterstäbe sind an den Gurten gelenkig angeschlossen und haben den Querschnitt F_3.



Bei der Berechnung der Knickbeanspruchung dieses Trägers durch eine Last P_0 müssen die allgemeinen Gleichgewichtsbedingungen im Gegensatz zur gewöhnlichen Fachwerktheorie am deformierten Träger angesetzt werden. Denn man weiß aus der Untersuchung des einteiligen Druckstabes, daß die Produkte aus den Verschiebungen und der knickenden Längskraft Momente erheblichen Betrages ergeben.

Sind ξ_i, η_i und ξ_k, η_k die wagerechten bzw. senkrechten Verschiebungen der Enden des vom Knoten i zum Knoten k führenden Stabes, so entsteht in diesem die Stabkraft

$$S_{ik} = \frac{E F_{ik}}{l_{ik}^2}\left[(\xi_k - \xi_i)(x_k - x_i) + (\eta_k - \eta_i)(y_k - y_i)\right]$$

Dabei sind quadratische Terme in ξ, η vernachlässigt. x, y sind die Koordinaten der nicht verschobenen Knoten, l_{ik} die Länge, F_{ik} der Querschnitt und E der Elastizitätsmodul des Stabes. Die in den Knoten $2k$ und $2k+1$ angreifenden Stabkräfte ergeben Resultierende, deren nach links bzw. unten positiv gezählten Komponenten P und Q lauten:

$$P_{2K} = \frac{\mathcal{E}F_2}{2\ell}(\xi_{2K-2} - 2\xi_{2K} + \xi_{2K+2}) + \frac{\mathcal{E}F_3\ell^2}{d^3}\left[\xi_{2K-1} - 2\xi_{2K} + \xi_{2K+1} + \frac{h}{\ell}(\eta_{2K+1} - \eta_{2K-1})\right]$$

$$P_{2K+1} = \frac{\mathcal{E}F_1}{2\ell}(\xi_{2K-1} - 2\xi_{2K+1} + \xi_{2K+3}) + \frac{\mathcal{E}F_3\ell^2}{d^3}\left[\xi_{2K} - 2\xi_{2K+1} + \xi_{2K+2} - \frac{h}{\ell}(\eta_{2K+2} - \eta_{2K})\right]$$

$$Q_{2K} = \frac{\mathcal{E}F_3\ell h}{d^3}\left[-(\xi_{2K+1} - \xi_{2K-1}) + \frac{h}{\ell}(-\eta_{2K-1} + 2\eta_{2K} - \eta_{2K+1})\right]$$

$$Q_{2K+1} = \frac{\mathcal{E}F_3\ell h}{d^3}\left[+(\xi_{2K+2} - \xi_{2K}) + \frac{h}{\ell}(-\eta_{2K} + 2\eta_{2K+1} - \eta_{2K+2})\right]$$

Führt man die dimensionslosen Zahlen ein:

$$c_1 = \frac{F_3\ell^3}{F_1 d^3} \qquad c_2 = \frac{F_3\ell^3}{F_2 d^3}$$

$$U_{2K+1} = \frac{2\mathcal{E}F_1}{P_0\mathcal{L}}\xi_{2K+1} \qquad u_{2K} = \frac{2\mathcal{E}F_2}{P_0\mathcal{L}}\xi_{2K}$$

$$V_{2K+1} = \frac{2\mathcal{E}F_1}{P_0\mathcal{L}}\frac{h}{\ell}\eta_{2K+1} \qquad v_{2K} = \frac{2\mathcal{E}F_2}{P_0\mathcal{L}}\frac{h}{\ell}\eta_{2K}$$

so erhält man:

$$\frac{P_{2K}}{2\ell} = \frac{P_0 L}{2\ell^2}\left[\ell^2\frac{u_{2K-2} - 2u_{2K} + u_{2K+2}}{(2\ell)^2} - c_2 u_{2K} + c_1\frac{U_{2K-1} + U_{2K+1}}{2} + c_1\ell\frac{V_{2K+1} - V_{2K-1}}{2\ell}\right]$$

$$\frac{P_{2K+1}}{2\ell} = \frac{P_0 L}{2\ell^2}\left[\ell^2\frac{U_{2K-1} - 2U_{2K+1} + U_{2K+3}}{(2\ell)^2} + c_2\frac{u_{2K} + u_{2K+2}}{2} - c_1 U_{2K+1} - c_2\ell\frac{v_{2K+2} - v_{2K}}{2\ell}\right]$$

$$\frac{Q_{2K}}{2\ell} = \frac{P_0 Lh}{2\ell^3}\left[-c_1\ell\frac{U_{2K+1} - U_{2K-1}}{2\ell} + c_2 v_{2K} - c_1\frac{V_{2K-1} + V_{2K+1}}{2}\right]$$

$$\frac{Q_{2K+1}}{2\ell} = \frac{P_0 Lh}{2\ell^3}\left[+c_2\ell\frac{u_{2K+2} - u_{2K}}{2\ell} - c_2\frac{v_{2K} + v_{2K+2}}{2} + c_1 V_{2K+1}\right]$$

Da in den Knoten des Trägers keine äußeren Lasten angreifen sollen, erfordern die Gleichgewichtsbedingungen zunächst, daß

$$P_{2K} = P_{2K+1} = 0 \quad \text{für} \quad K \neq n, 0,$$

während die Kräfte Q durch den Biegungswiderstand der Gurte zu kompensieren sind. Das ergibt ein System von vier simultanen Differenzengleichungen, aus denen die Verschiebungen U, u und V, v zu berechnen sind.

Dieses System von Differenzengleichungen soll hier ersetzt werden durch ein System von Differentialgleichungen. Nach den Erfahrungen, die man im praktischen Rechnen mit der Vertauschung von Differentialgleichungen und Differenzengleichungen gemacht hat, ist zu erwarten, daß auch die Lösungen der Differentialgleichungen für den hier betrachteten Träger nicht allzuweit von der Wirklichkeit abliegen.

A. Die Gleichungen $P_{2\kappa} = P_{2\kappa+1} = 0$ führen zunächst zu:

$$1) \quad \frac{d^2u}{ds^2} - (2n)^2 c_2\, u + (2n)^2 c_1\, U + (2n)\, c_1 \frac{dV}{ds} = 0$$

$$2) \quad \frac{d^2U}{ds^2} - (2n)^2 c_1\, U + (2n)^2 c_2\, u - (2n)\, c_2 \frac{dv}{ds} = 0$$

Dabei ist $x = L \cdot s$ und $L = 2\,nl$ eingeführt worden. Die Randbedingungen lauten:

$$u(0) = U(0) = 0$$

$$\left(\frac{du}{ds}\right)_1 = -\frac{2P_2}{P_0} = -(1-2\varepsilon)\,; \left(\frac{dU}{ds}\right)_1 = -\frac{2P_1}{P_0} = -(1+2\varepsilon)$$

P_1 und P_2 sind die auf die obere und untere Gurtung entfallenden Komponenten von P_0. Da wegen der Lagerung des Trägers ferner gefordert werden muß:

$$\left(\frac{dv}{ds'}\right)_0 = \left(\frac{dV}{ds'}\right)_0 = 0 \quad ; \quad \left(\frac{d^2v}{ds'^2}\right)_1 = \left(\frac{d^2V}{ds'^2}\right)_1 = 0$$

müssen u und U weiter erfüllen:

$$\left(\frac{d^2u}{ds'^2}\right)_0 = \left(\frac{d^2U}{ds'^2}\right)_0 = 0$$

und (vergl. (1), (2))

$$\left(\frac{d^3u}{ds'^3}\right)_1 = +(2n)^2 c_2 \left(\frac{du}{ds'}\right)_1 - (2n)^2 c_1 \left(\frac{dU}{ds}\right)_1 = -(2n)^2\left[(c_2 - c_1) - 2\varepsilon(c_2 + c_1)\right]$$

$$\left(\frac{d^3U}{ds'^3}\right)_1 = -(2n)^2 c_2 \left(\frac{du}{ds'}\right)_1 + (2n)^2 c_1 \left(\frac{dU}{ds'}\right)_1 = +(2n)^2\left[(c_2 - c_1) - 2\varepsilon(c_2 + c_1)\right]$$

Durch wechselseitige Elimination von u und U erhält man:

$$3) \quad \frac{d^4u}{ds'^4} - (2n)^2(c_1 + c_2)\frac{d^2u}{ds'^2} = -(2n)\, c_1 \frac{d^3V}{ds'^3} + (2n)^3 c_1 \left(c_1 \frac{dV}{ds'} - c_2 \frac{dv}{ds'}\right)$$

$$4) \quad \frac{d^4U}{ds'^4} - (2n)^2(c_1 + c_2)\frac{d^2U}{ds'^2} = +(2n)\, c_2 \frac{d^3v}{ds'^3} + (2n)^3 c_2 \left(c_1 \frac{dV}{ds'} - c_2 \frac{dv}{ds'}\right)$$

Mit der Abkürzung

$$\beta = 2n\sqrt{c_1 + c_2}$$

kann man die Lösungen dieser Gleichungen darstellen in der Form:

$$5) \quad u(s) = u_0(s) + \frac{2nc_1}{\beta^2}\int_0^1 g(s,t)\left[-\frac{d^3v}{dt^3} + (2n)^2\left(c_1\frac{dv}{dt} - c_2\frac{dv}{dt}\right)\right]dt$$

$$6) \quad U(s) = U_0(s) + \frac{2nc_2}{\beta^2}\int_0^1 g(s,t)\left[+\frac{d^3v}{dt^3} + (2n)^2\left(c_1\frac{dv}{dt} - c_2\frac{dv}{dt}\right)\right]dt$$

u_0 und U_0 bedeuten die die Randbedingungen erfüllenden Lösungen der zu 3) und 4) gehörenden homogenen Gleichungen. Es ist:

$$u_0(s) = -(1-2\varepsilon)s - \frac{(2n)^2}{\beta^3}\left[(c_2-c_1) - 2\varepsilon(c_2+c_1)\right]\left(\frac{\sin\beta s}{\mathfrak{Sof}\beta} - \beta s\right)$$

$$U_0(s) = -(1+2\varepsilon)s + \frac{(2n)^2}{\beta^3}\left[(c_2-c_1) - 2\varepsilon(c_2+c_1)\right]\left(\frac{\sin\beta s}{\mathfrak{Sof}\beta} - \beta s\right)$$

Die in 5) und 6) zugefügten Integrale sind Partikularlösungen. Man gelangt zu ihnen und zum Ausdruck für $g\,(s,\,t)$, wenn man 3) und 4) liest als die Differentialgleichungen für die Durchbiegungen u und U eines Balkens, der die Länge 1 und das Trägheitsmoment 1 hat, der ferner in seiner Längsrichtung durch die Kraft β^2 gezogen wird und quer zu seiner Achse eine kontinuierliche Last trägt, die durch die rechten Seiten von 3) und 4) gegeben wird. $g\,(s,\,t)/\beta^2$ stellt dann die Durchbiegung dieses Balkens an der Stelle s dar, wenn an der Stelle t die Last 1 wirkt. Zur Herstellung des Gleichgewichtes muß man sich am rechten Balkenende noch das Moment $g\,(1,\,t)/\beta^2$ angebracht denken. Man erhält so für $g\,(s,\,t)$ die Gleichungen:

$$\frac{1}{\beta^2}\frac{\partial^2 g}{\partial s^2} - g = -s \quad \text{für} \quad s \leqq t$$

$$\frac{1}{\beta^2}\frac{\partial^2 g}{\partial s^2} - g = -t \quad \text{für} \quad s \geqq t$$

Damit u und U die vorgeschriebenen Randbedingungen erfüllen, muß sein:

$$g(0,t) = 0\,; \quad \left(\frac{\partial g}{\partial s}\right)_{s=1} = 0$$

Es folgt damit:

$$g(s,t) = s - \frac{1}{\beta\,\mathfrak{Sof}\beta}\sin\beta s\,\mathfrak{Sof}\beta(1-t) \quad \text{für} \quad s \leqq t$$

$$g(s,t) = t - \frac{1}{\beta\,\mathfrak{Sof}\beta}\mathfrak{Sof}\beta(1-s)\sin\beta t \quad \text{für} \quad s \geqq t$$

Durch zweimalige partielle Integration findet man ferner:

$$\int_0^1 g(s,t)\,\frac{d^3V,v}{dt^3}\,dt = \left[g\cdot\frac{d^2V,v}{dt^2}\right]_0^1 - \left[\frac{\partial g}{\partial t}\,\frac{dV,v}{dt}\right]_0^1 + \int_0^1 \frac{\partial^2 g}{\partial t^2}\,\frac{dV,v}{dt}\,dt$$

$$= -\frac{\beta}{Lo/\beta}\int_0^1 \gamma(st)\,\frac{dV,v}{dt}\,dt$$

mit

$$\gamma(s,t) = \mathfrak{Sin}\beta s\; Lo/\beta(1-t) \quad \text{für } s \leqq t$$

$$\gamma(s,t) = Lo/\beta(1-s)\;\mathfrak{Sin}\beta t \quad \text{für } s \geqq t$$

Dabei ist benutzt:

$$\left[\frac{d^2V,v}{dt^2}\right]_{t=1} = \left[\frac{d^2V,v}{dt^2}\right]_{t=0} = 0$$

und

$$g(s,0) = \left[\frac{\partial g}{\partial t}\right]_{t=1} = 0$$

Man erhält auf diese Weise schließlich

$$I)\quad u(s) = u_0(s) + \frac{2uc_1}{\beta Lo/\beta}\int_0^1 \gamma(s,t)\,\frac{dV}{dt}\,dt + \frac{(2u)^3 c_1}{\beta^2}\int_0^1 g(s,t)\left(c_1\frac{dV}{dt} - c_2\frac{dv}{dt}\right)dt$$

$$II)\quad U(s) = U_0(s) - \frac{2uc_2}{\beta Lo/\beta}\int_0^1 \gamma(s,t)\,\frac{dv}{dt}\,dt + \frac{(2u)^3 c_2}{\beta^2}\int_0^1 g(s,t)\left(c_1\frac{dV}{dt} - c_2\frac{dv}{dt}\right)dt$$

B. Zu einer analogen Darstellung für $\frac{dv}{ds}$ und $\frac{dV}{ds}$ gelangt man, indem man beachtet, daß die von der Vergitterung auf die Gurte übertragenen, hier kontinuierlich zu denkenden Kräfte $q(x)$ und $Q(x)$ durch den Biegungswiderstand der Gurte aufgenommen werden müssen. Es ist:

$$q(x) = -\frac{P_0 h}{2L^2}(2n)^2\left[c_1\frac{dU}{ds} + (2n)(c_1 V - c_2 v)\right]$$

$$Q(x) = +\frac{P_0 h}{2L^2}(2n)^2\left[c_2\frac{du}{ds} + (2n)(c_1 V - c_2 v)\right]$$

Ferner werden die Gurte durch die Längskräfte P_1 und P_2 auf Knickung beansprucht. Es gelten daher für die senkrechten Verschiebungen v und V die Differentialgleichungen:

$$7)\quad \frac{d^4v}{ds^4} + a_2^2\frac{d^2v}{ds^2} = +(2n)^3 f_2\left[c_1\frac{dU}{ds} + (2n)(c_1 V - c_2 v)\right]$$

$$8)\quad \frac{d^4V}{ds^4} + a_1^2\frac{dV}{ds^2} = -(2n)^3 f_1\left[c_2\frac{du}{ds} + (2n)(c_1 V - c_2 v)\right]$$

mit den Abkürzungen:

$$a_1^2 = \frac{P_1 L^2}{E J_1} \quad , \quad a_2^2 = \frac{P_2 L^2}{E J_2}$$

$$f_1 = \frac{F_1 h^2}{J_1} \quad ; \quad f_2 = \frac{F_2 h^2}{J_2}$$

Das negative Vorzeichen auf der rechten Seite ist erforderlich, weil die Verschiebungen nach oben positiv eingeführt sind. Durch analoge Überlegungen wie unter A) gelangt man zu der Darstellung:

$$\text{III)} \quad \frac{dv}{ds'} = +(2n)^3 f_2 \left\{ \frac{1}{a_2 \cos a_2} \int_0^{\Delta} K(a_2, s, t) \left[u + (1 - c_1) U \right] dt + C_2 \, v_0'(s') \right\}$$

$$\text{IV)} \quad \frac{dV}{ds'} = -(2n)^3 f_1 \left\{ \frac{1}{a_1 \cos a_1} \int_0^{\Delta} K(a_1, s, t) \left[U + (1 - c_2) u \right] dt + C_1 \, V_0'(s') \right\}$$

Die Einflußfunktion $K\ (a,\ s,\ t)$ lautet hier:

$$K(a, s, t) = \sin a s \cos a (1 - t) \quad \text{für } s \leqq t$$

$$K(a, s, t) = \cos a (1 - s) \sin a t \quad \text{für } s \geqq t$$

Die Konstanten C_1 und C_2 vor den homogenen Lösungen

$$v_0'(s') = s' - \frac{\sin a_2 s'}{a_2 \cos a_2}$$

$$V_0'(s') = s' - \frac{\sin a_1 s'}{a_1 \cos a_1}$$

sind so zu bestimmen, daß

$$a_2^2 \left(\frac{dv}{ds} \right)_1 + \left(\frac{d^3 v}{ds'^3} \right)_1 = 0$$

$$a_1^2 \left(\frac{dV}{ds'} \right)_1 + \left(\frac{d^3 V}{ds'^3} \right)_1 = 0$$

wird. Die beiden letzten Gleichungen besagen, daß an den rechten Enden der Gurte die Querkraft gleich $P_2 v'(1)$ bzw. $P_1 V'(1)$ wird.

C. Die Auflösung der Integralgleichungen I)—IV) wird bewerkstelligt, indem man mit $u_0(s)$ und $U_0(s)$ in III) und IV) eingeht und dadurch erste Näherungen für $\frac{dv}{ds}$ und $\frac{dV}{ds}$ gewinnt, die vermittels I) und II) wieder zu besseren Werten für $u(s)$ und U(s) führen. Dieses Iterationsverfahren konvergiert, solange α_1 und α_2

kleiner als $\frac{\pi}{2}$ sind und unterhalb gewisser kritischer, von den Trägheitsmomenten und Querschnitten des Trägers abhängenden Werten liegen.

Die Gleichungen für die kritischen α-Werte sollen hier nur für den Fall aufgestellt werden, daß die beiden Gurte gleich sind. Die Last soll nicht exzentrisch angreifen, also:

$$\varepsilon = 0 \qquad c_1 = c_2 = c = \frac{\mathfrak{F}_3 L^3}{(2n)^3 \mathfrak{F} d^3} \qquad f_1 = f_2 = f = \frac{\mathfrak{F} h^2}{\mathfrak{J}} \qquad a_1^2 = a_2^2 = a^2 = \frac{P_0 L^2}{2 E \mathfrak{J}}$$

Man kann dann I)—IV) zusammenfassen zu:

$$I') \quad u(s) + U(s) = -2s - 2nc \int_0^s \bar{y}(s,t) \frac{d}{dt}(v - V)\, dt$$

$$II') \quad u(s) - U(s) = +\frac{2nc}{\beta \mathfrak{Lof}\beta} \int_0^s \gamma(s,t) \frac{d}{dt}(v + V)\, dt$$

$$III') \quad \frac{d}{ds}(v + V) = \frac{(2n)^3 f c}{a^2}(u - U)_1 \left(s - \frac{\sin as}{a \cos a}\right) + \frac{(2n)^3 f c}{a \cos a} \int_0^s K(s,t)(u - U)\, dt$$

$$IV') \quad \frac{d}{ds}(v - V) = \frac{(2n)^3 f (2-c)}{a^2}(u + U)_1 \left(s - \frac{\sin as}{a \cos a}\right) + \frac{(2n)^3 f (2-c)}{a \cos a} \int_0^s K(s,t)(u + U)\, dt$$

mit

$$\bar{y}(s,t) = s \quad \text{für} \quad s \leqq t$$
$$\bar{y}(s,t) = t \quad \text{für} \quad s \geqq t$$

Durch Einsetzen von I) in IV) und II) in III) ergibt sich:

$$A) \quad \frac{d}{ds}(v - V) = \frac{(2n)^3 f (2-c)}{a^2}(u(1) + U(1) + 2)\left(s - \frac{\sin as}{a \cos a}\right) - \frac{(2n)^4 f c (2-c)}{a^3 \cos a} \int_0^s G(s,t) \frac{d(v-V)}{dt} dt$$

$$B) \quad \frac{d}{ds}(v + V) = \frac{(2n)^3 f \cdot c}{a^2}(u(1) - U(1))\left(s - \frac{\sin as}{a \cos a}\right) + \frac{(2n)^4 f \cdot c^2}{a\beta(a^2 + \beta^2) \cos a \, \mathfrak{Lof}\beta} \int_0^s K(s,t) \frac{d(v+V)}{dt} dt$$

mit den Einflußfunktionen:

$$G(s,t) = \sin as' \cos a(1-t) - s a \cos a$$
$$K(s,t) = \beta \mathfrak{Lof}\beta \sin as' \cos a(1-t) - a \cos a \, \mathfrak{sin}\beta s' \mathfrak{Lof}\beta(1-t) \quad \text{für } s \leqq t$$
$$G(s,t) = \cos a(1-s) \sin at - t a \cos a$$
$$K(s,t) = \beta \mathfrak{Lof}\beta \cos a(1-s) \sin at - a \cos a \, \mathfrak{Lof}\beta(1-s) \, \mathfrak{sin}\beta t \quad \text{für } s' \geqq t$$

Man rechnet leicht nach, daß die homogenen Integralgleichungen

$$z(s) = \lambda \int_0^1 G(s,t)\, z(t)\, dt \qquad Z(s) = \Lambda \int_0^1 K(s,t)\, Z(t)\, dt$$

die Lösungen

$$z(s) = Z(s) = \sin \frac{r\pi}{2} s \qquad r = 1, 3, 5 \ldots\ldots$$

mit den Eigenwerten

$$\lambda = -\frac{\left[a^2 - r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right] r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2}{a^3 \cos a} \qquad \Lambda = -\frac{\left[a^2 - r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]\left[\beta^2 + r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]}{a\beta(a^2+\beta^2)\cos a \,\mathfrak{Lof}\,\beta}$$

haben. Die Theorie der Integralgleichungen lehrt, daß die Gleichungen A) und B) nicht identisch verschwindende Lösungen haben, wenn

$$-\frac{(2n)^4 f \cdot c \cdot (2-c)}{a^3 \cos a} = \lambda \qquad U(1) + u(1) = -2$$

$$+\frac{(2n)^4 f \cdot c^2}{a\beta(a^2+\beta^2)\cos a \,\mathfrak{Lof}\,\beta} = \Lambda \qquad u(1) - U(1) = 0,$$

und daß die Beträge der Lösungen von A) und B) sehr stark anwachsen, wenn

$$(2n)^4 f \cdot c(2-c) \to \left[a^2 - r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right] r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2$$

$$(2n)^4 f \cdot c^2 \to \left[a^2 - r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]\left[\beta^2 + r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]$$

und

$$U(1) + u(1) \neq -2$$
$$u(1) - U(1) \neq 0.$$

Praktisch kann man $\varepsilon = 0$ nie mit Sicherheit gewährleisten, d. h. man muß immer mit den beiden letzten Ungleichungen für $u(1)$ und $U(1)$ rechnen. Das bedeutet aber: Für

$$P_0 \to \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{2EJ}{L^2}\left[r^2 + \frac{(2n)^4 f \cdot c \cdot (2-c)}{r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^4}\right]$$

sind sehr starke Beträge für $\frac{d}{ds}(v-V)$ und damit auch für $(v-V)$ zu erwarten, so daß mit einem Versagen der Gitterstäbe zu rechnen ist. Für

$$P_0 \to \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{2EJ}{\mathfrak{L}^2}\left[r^2 - \frac{(2n)^4 \cdot f \cdot c^2}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\left[(2n)^2 \cdot 2c + r^2\left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right]}\right]$$

dagegen tritt eine sehr große seitliche Auslenkung des ganzen Trägers ein — große Beträge für $(v+V)$ —, so daß eine Gefährdung der Gurte vorliegt.

Zur Ausführung von Zahlenrechnung empfiehlt es sich, vorher die Integralgleichungen I)—IV) umzuformen durch Überlegungen, die sich in der erwähnten Arbeit von Herrn Trefftz finden. Doch muß das einem Aufsatz in einer Fachzeitschrift vorbehalten bleiben.

Neuere Literatur

R. v. Mises und J. Ratzersdorfer, Zeitschrift für angew. Math. u. Mech. 1926.

E. Trefftz, ebenda 1923.

Die geodätischen Linien auf der Pseudosphäre

Von Geheimrat Prof. Dr. Friedrich Schilling

In unserem physikalischen Kolloquium habe ich im Januar einen Vortrag gehalten über die „Pseudosphäre und die nichteuklidische Geometrie". Das physikalische Kolloquium findet in jedem Wintersemester alle Woche statt und steht zur Zeit unter der Leitung unseres Kollegen Prof. Dr. Buchwald. Hier werden von Mitgliedern des Kollegiums oder auch von anderen Herren, gelegentlich auch von auswärtigen Professoren, wissenschaftliche Vorträge mit anschließender Diskussion über neuere Ergebnisse der Physik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften gehalten.

Mein Vortrag hatte folgendes Ziel: Von den beiden nichteuklidischen Geometrien, der elliptischen und der hyperbolischen Geometrie, d. h. den Geometrien, bei denen man in einer Ebene zu einer Geraden keine oder zwei Parallelen durch einen Punkt ziehen kann, findet die erste ihre einfache Deutung auch auf der Kugel, überhaupt auf jeder Fläche konstanter positiver Krümmung. Es sollte nun in einfacher und anschaulicher Weise gezeigt werden, wie die zweite, die hyperbolische Geometrie, entsprechend ihre Deutung auf den Flächen konstanter negativer Krümmung, insbesondere der einfachsten unter ihnen, der Pseudosphäre, findet. Hierbei ist es vor allem wichtig, die geodätischen Linien der Pseudosphäre analytisch und anschaulich zu beherrschen. Auf der Kugel sind ja die geodätischen Linien durch die größten Kreise gegeben. Diese geodätischen Linien entsprechen eben den Geraden der nichteuklidischen Ebene. Im folgenden soll nun aus meinem Vortrage diese besonders einfache und anschauliche Bestimmung der geodätischen Linien auf der Pseudosphäre wiedergegeben werden. Eine weitere Ausführung meines Vortrages wird unter dem Titel meines Vortrages in Kürze als besondere Schrift erscheinen.

Die Pseudosphäre wird durch die Gleichungen gegeben:

$$(1\,a,\,b,\,c) \qquad \begin{cases} X = \varrho \cdot \cos\varphi, \\ Y = \varrho \cdot \sin\varphi, \\ Z = r \cdot \log \dfrac{r + \sqrt{r^2 - \varrho^2}}{\varrho} - \sqrt{r^2 - \varrho^2}. \end{cases}$$

In ihnen sind X, Y, Z rechtwinklige kartesische Raumkoordinaten und die Parameter ϱ, φ die Polarkoordinaten der (X, Y)-Ebene, zugleich also auch die Polarkoordinaten der Projektion eines Flächenpunktes P auf die (X, Y)-Ebene. Die Fläche ist eine Rotationsfläche; deren Meridiankurve wird durch die Figur 1a, die Fläche selbst durch die Figur 1b veranschaulicht. Die Konstante r ist also der

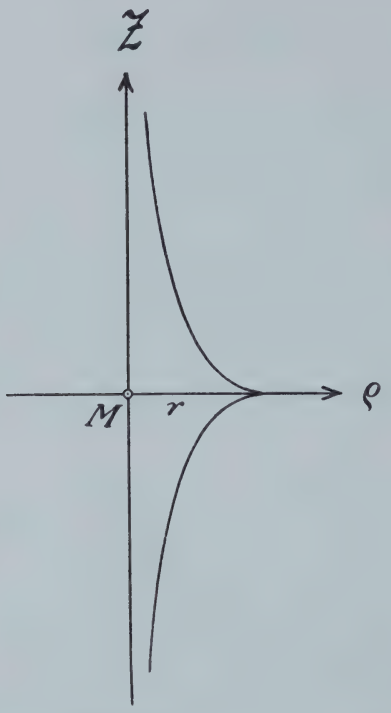


Fig. 1 a

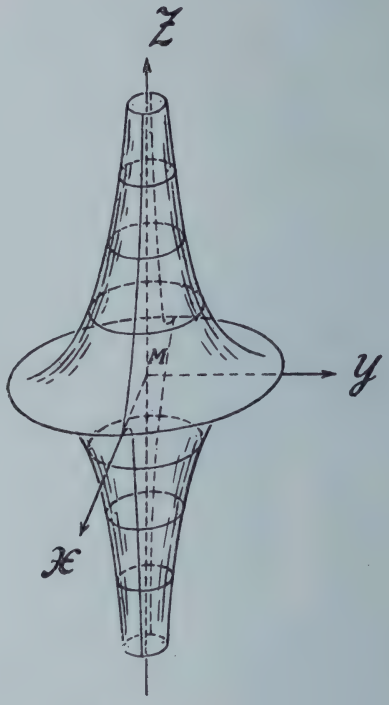


Fig. 1 b

Radius des Parallelkreises der Fläche in der (X, Y)-Ebene. Es ist leicht zu zeigen, daß diese Fläche die konstante Krümmung $-\frac{1}{r^2}$ besitzt, während ja die Kugel mit dem Radius r die konstante Krümmung $+\frac{1}{r^2}$ hat.

Wir bilden nun die Pseudosphäre auf eine Ebene mit den rechtwinkligen kartesischen (ξ, η)-Koordinaten ab durch die Gleichungen:

(2 a, b)
$$\begin{cases} \xi = r \cdot \varphi, \\ \eta = \frac{r^2}{\varrho}, \end{cases}$$

oder umgekehrt:

(3 a, b)
$$\begin{cases} \varphi = \frac{\xi}{r}, \\ \varrho = \frac{r^2}{\eta}. \end{cases}$$

Wir betrachten fernerhin nur die eine Hälfte der Pseudosphäre $Z \geqq 0$ und denken diese längs der Meridiankurve $\varphi = \pm \pi$ aufgeschnitten.

1. Durch die Gleichungen (2a, b) wird dann diese aufgeschnittene Hälfte der Pseudosphäre eindeutig auf das schraffierte Gebiet der (ξ, η)-Ebene in der (ebenso wie einige analoge spätere Figuren im verkleinerten Maßstab dargestellten) Figur 2a abgebildet.

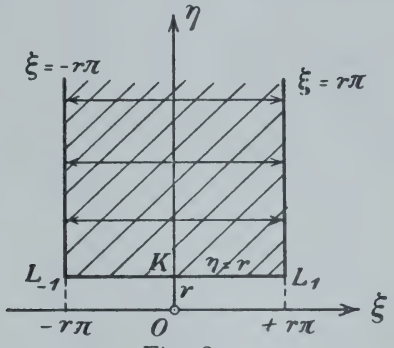


Fig. 2a

Dieses Gebiet wird begrenzt von der Abbildung $L_{-1} L_1$ des „Grundkreises" der Pseudosphäre in der (X, Y)-Ebene und von der Abbildung der beiden Ufer $\varphi = \pm \pi$ des eingeschnittenen Meridians.

Wie wir einen Kreiszylinder unendlich oft überdeckt oder unendlich oft auf eine Ebene abgerollt denken können, so können wir auch die Pseudosphäre unendlich oft überdeckt oder unendlich oft auf die (ξ, η)-Ebene abbilden. Wir brauchen ja nur das schraffierte Gebiet der Figur 2a beliebig oft zu wiederholen, wie es die Figur 2b angibt.

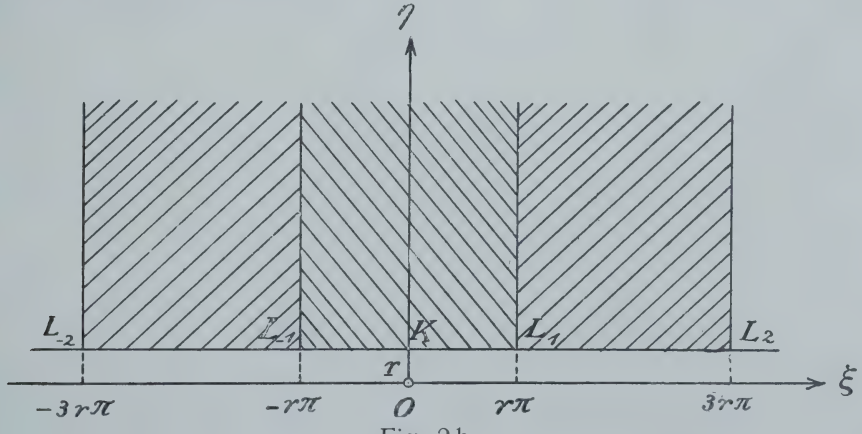


Fig. 2b

Wir wollen jetzt das Bogenelement $d\sigma$ der Pseudosphäre auf die (ξ, η)-Ebene übertragen. Es ist ja:

$$d\sigma = \sqrt{dX^2 + dY^2 + dZ^2} = \sqrt{\varrho^2 d\varphi^2 + d\varrho^2 + dZ^2}.$$

Nun ist nach der Gleichung (1 c):

$$dZ = -\frac{\sqrt{r^2 - \varrho^2}}{\varrho} \cdot d\varrho.$$

Also ist:

$$d\sigma = \sqrt{\varrho^2 d\varphi^2 + \frac{r^2}{\varrho^2} \cdot d\varrho^2}. \tag{4}$$

Bei der Abbildung durch die Gleichungen (3 a, b) geht dieser Ausdruck nun über in das gleich große Bogenelement der (ξ, η)-Ebene:

$$d\sigma = r \cdot \frac{\sqrt{d\xi^2 + d\eta^2}}{\eta}. \tag{5}$$

Dieses ist also von dem Bogenelement der euklidischen Geometrie $\sqrt{d\xi^2 + d\eta^2}$ durch den Faktor $\frac{r}{\eta}$ unterschieden, bedingt also eine neue eigenartige Maßbestimmung in der (ξ, η)-Ebene, die wir als hyperbolische Maßbestimmung bezeichnen wollen. (Man erkennt auch leicht aus der Formel (5), daß die Abbildung der Pseudosphäre auf die (ξ, η)-Ebene eine winkeltreue oder konforme ist.) Diese hyperbolische Maßbestimmung wollen wir nun auf die ganze Halbebene $\eta \geq 0$ ausgedehnt denken.

In der (ξ, η)-Ebene bemerken wir sogleich weiter:

2. Jede Strecke PQ der η-Halbachse mit $\eta \geq 0$ ist kleiner als jeder andere die Endpunkte P, Q verbindende Bogen, d. h. die Halbgerade $\xi = 0$ $(\eta \geq 0)$ ist eine geodätische Linie (eine Pseudogerade) der hyperbolischen Maßbestimmung. (Fig. 3.)

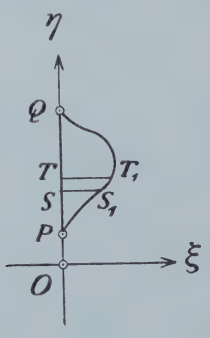


Fig. 3

Denn jedes Bogenelement ST der Strecke ist stets kleiner oder höchstens gleich dem durch die Parallelen zur ξ-Achse durch die Punkt S, T abgeschnittenen Bogenelement S_1T_1 des Bogens $\overset{\frown}{PQ}$.

Wir können nun leicht aus der Halbgeraden $\xi = 0$ neue geodätische Linien (Pseudogeraden) gewinnen:

Bei der Transformation:

$$\text{(6 a, b)} \qquad \begin{cases} \xi^* = \xi + \beta, \\ \eta^* = \eta \end{cases}$$

bleibt ja das Bogenelement (5) unverändert (d. h. es ist eine Invariante der Transformation). Durch diese Transformation geht aber aus der Halbgeraden $\xi = 0$, der halben Ordinatenachse, eine beliebige andere halbe Ordinatenlinie hervor. Es folgt also, daß auch jede halbe Ordinatenlinie eine geodätische Linie ist.

Ferner betrachten wir die Transformation durch reziproke Radien oder die Inversion am Einheitskreis um den Koordinatenanfangspunkt:

$$\text{(7 a, b)} \qquad \begin{cases} \xi^* = \dfrac{\xi}{\xi^2 + \eta^2}, \\ \eta^* = \dfrac{\eta}{\xi^2 + \eta^2}, \end{cases}$$

oder bei Einführung von Polarkoordinaten R, ϑ:

$$\text{(7'a, b)} \qquad \begin{cases} R^* = \dfrac{1}{R}, \\ \vartheta^* = \vartheta, \end{cases}$$

wobei:

$$\xi = R \cdot \cos \vartheta, \quad \eta = R \cdot \sin \vartheta \qquad \text{und} \qquad \xi^* = R^* \cdot \cos \vartheta, \quad \eta^* = R^* \cdot \sin \vartheta \text{ ist.}$$

Dann ist auch gemäß der Gleichung (7'a):

$$R \cdot dR^* + R^* \cdot dR = 0$$

oder:

$$\frac{dR}{R} = -\frac{dR^*}{R^*}$$

und ferner:

$$\sqrt{d\xi^2 + d\eta^2} = R \cdot \sqrt{\frac{dR^2}{R^2} + d\vartheta^2},$$

$$\sqrt{d\xi^{*2} + d\eta^{*2}} = R^* \cdot \sqrt{\frac{dR^{*2}}{R^{*2}} + d\vartheta^2}.$$

Also folgt:

$$\text{(8)} \qquad \frac{\sqrt{d\xi^2 + d\eta^2}}{\eta} = \frac{\sqrt{d\xi^{*2} + d\eta^{*2}}}{\eta^*}.$$

Dieses Resultat ist natürlich auch leicht rein geometrisch zu gewinnen. Durch die Transformation (7 a, b) geht nun aus der Halbgeraden ($\xi = 1$, $\eta \geqq 0$) der Halbkreis über der Einheitsstrecke OE hervor (Fig. 4).

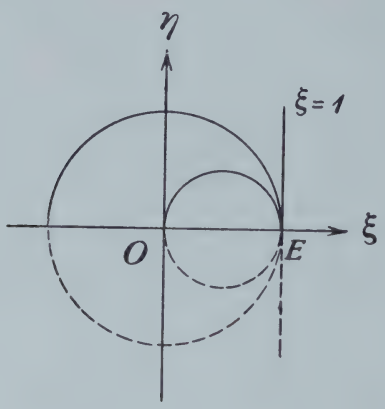


Fig. 4

Also folgt aus den Gleichungen (5) und (8):

Auch der Halbkreis über der Einheitsstrecke ist eine geodätische Linie.

Endlich betrachten wir die Transformation

$$(9\,a,\,b) \qquad \begin{cases} \xi^* = \alpha \cdot \xi, \\ \eta^* = \alpha \cdot \eta. \end{cases}$$

Auch bei dieser Transformation bleibt das Bogenelement der Formel (5) unverändert. Diese Transformation ist ja euklidisch eine Ähnlichkeitstransformation vom Anfangspunkt O aus. Wir gewinnen somit leicht folgendes Resultat:

3. Alle Halbkreise der Halbebene $\eta \geqq 0$, die auf der ξ-Achse senkrecht stehen, einschließlich der halben Ordinatenlinien, sind geodätische Linien der hyperbolischen Maßbestimmung.

Wir erkennen weiter:

4. Von jedem Punkte P der Halbebene $\eta \geqq 0$ geht ein Büschel von geodätischen Linien aus und durch je zwei beliebige Punkte P, Q der Halbebene geht stets eine und nur eine geodätische Linie.

Hieraus folgt sogleich:

5. Noch andere geodätische Linien als die im Satz 3 genannten kann es nicht geben.

Nun gehen wir sogleich dazu über, diese Resultate auf die Pseudosphäre zu übertragen. Der Transformation (6 a, b) entspricht gemäß den Gleichungen (3 a, b) bei der Pseudosphäre einfach die Drehung um die Z-Achse. Zwei geodätische Linien der (ξ, η)-Ebene, die durch die Transformation (6 a, b) ineinander übergehen, entsprechen zwei geodätischen Linien der

Pseudosphäre, die durch Drehung um die Z-Achse ineinander übergehen. Der besonderen geodätischen Geraden der (ξ, η)-Ebene, die durch die Halbgerade $\xi = 0$ dargestellt wird, entspricht ja auf der Pseudosphäre der Meridian $\varphi = 0$ als geodätische Linie. Von diesem Falle abgesehen, können wir uns also ersichtlich weiter darauf beschränken, die geodätischen Linien der (ξ, η)-Ebene, die durch die Halbkreise mit dem Mittelpunkt im Koordinatenanfangspunkt dargestellt werden, auf die Pseudosphäre zu übertragen. Dort erhalten wir dann die geodätischen Linien, die zur (X, Z)-Ebene symmetrisch liegen, d. h. ihren „Scheitelpunkt" auf der Meridiankurve $\varphi = 0$ liegen haben. Die Gleichung eines solchen Halbkreises lautet nun:

$$\xi^2 + \eta^2 = l^2, \tag{10}$$

wo l der Radius ist. Durch die Transformation (2a, b) ergibt sich hieraus die Gleichung für die Projektion der entsprechenden geodätischen Linie der Pseudosphäre auf die (X, Y)-Ebene:

$$r^2\varphi^2 + \frac{r^4}{\varrho^2} = l^2$$

oder:

$$\varphi = \sqrt{\frac{l^2}{r^2} - \frac{r^2}{\varrho^2}}. \tag{11}$$

6. Die geodätischen Linien der Pseudosphäre sind also durch die Gleichungen (11) und (1c) für die einzelnen Werte von l dargestellt.

Um nun die Übertragung der geodätischen Linien von der (ξ, η)-Ebene auf die Pseudosphäre auch anschaulich einfach zu erfassen, wollen wir die Transformation (3a, b) durch die Aufeinanderfolge der folgenden beiden ersetzen:

$$\begin{cases} \overline{\varphi} = \dfrac{\xi}{r}, \\ \overline{\varrho} = \eta \end{cases} \tag{12a, b}$$

und

$$\begin{cases} \varphi = \overline{\varphi}, \\ \varrho = r^2 \cdot \dfrac{1}{\overline{\varrho}}, \end{cases} \tag{13a, b}$$

wo die Größen $(\overline{\varrho}, \overline{\varphi})$ auch die Polarkoordinaten in der (X, Y)-Ebene sein sollen, ebenso wie die Größen (ϱ, φ).

Die Abbildung der Gleichungen (12a, b) führt jeden Punkt $P = (\xi, \eta)$ des schraffierten Gebietes der (ξ, η)-Ebene in der Figur 5a in einen solchen Punkt $\overline{P}$ im Äußeren des Grundkreises $\varrho = r$ der (X, Y)-Ebene in der Figur 5b über, daß die der Abszisse $\xi = OP'$ gleiche Strecke KQ der Figur 5a der gleich große Bogen $\overset{\frown}{KQ}$ des Grundkreises (Figur 5b) mit dem zur Abszisse ξ gleichen

Vorzeichen der Abweichung $\bar{\varphi}$ geworden ist und die Ordinate $\eta = P'P$ der Radiusvektor $\bar{\varrho}$ des entsprechenden Punktes $\bar{P}$ der (X, Y)-Ebene.

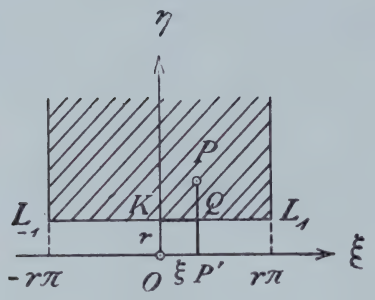


Fig. 5a

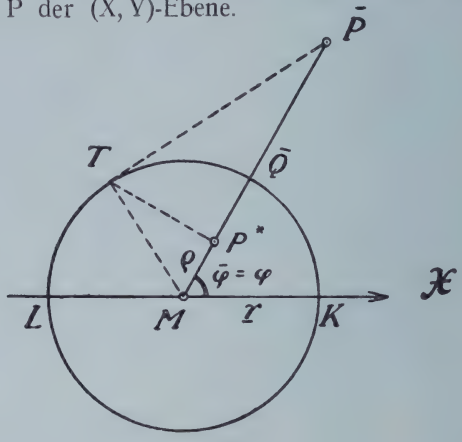


Fig. 5b

Die Abbildung der Gleichungen (13a, b) aber führt den Punkt $\bar{P}$ in den durch Inversion an dem Grundkreise sich ergebenden Punkt P* im Innern des Grundkreises über.

7. Hiermit ist dann von selbst auch die einfache geometrische Konstruktion gegeben, die punktweise jede geodätische Linie der (ξ, η)-Ebene in die Projektion der entsprechenden geodätischen Linie der Pseudosphäre auf die (X, Y)-Ebene überführt.

Wir müssen nur noch auf folgendes hierbei hinweisen: Wenn die einzelne geodätische Linie der (ξ, η)-Ebene, d. h. der Halbkreis mit dem Mittelpunkt O, über den Rand des schraffierten Gebietes der Figur 5a hinübergreift, so müssen am besten diese übergreifenden Teile zunächst in das schraffierte Gebiet übertragen werden. In den Figuren (6a, b) — (11a, b) sind nun eine Reihe von aufeinanderfolgenden geodätischen Linien der (ξ, η)-Ebene und die ihnen entsprechenden Projektionen der geodätischen Linien der Pseudosphäre dargestellt. Wir erkennen insbesondere auch die einander entsprechenden Doppelpunkte in den zugehörigen Paaren von Figuren.

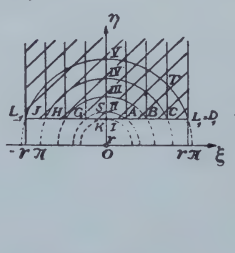


Fig. 6a

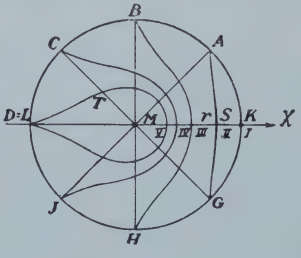


Fig. 6b

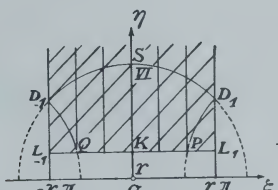


Fig. 7 a

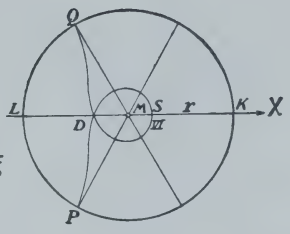


Fig. 7 b

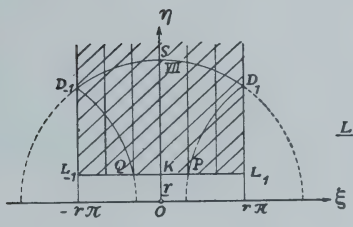


Fig. 8 a

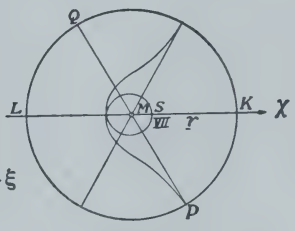


Fig. 8 b

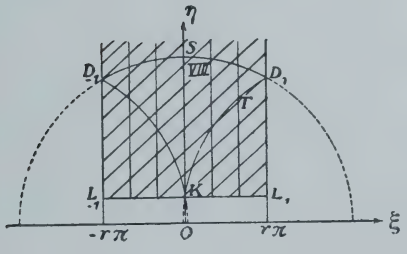


Fig. 9 a

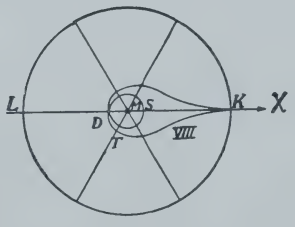


Fig. 9 b

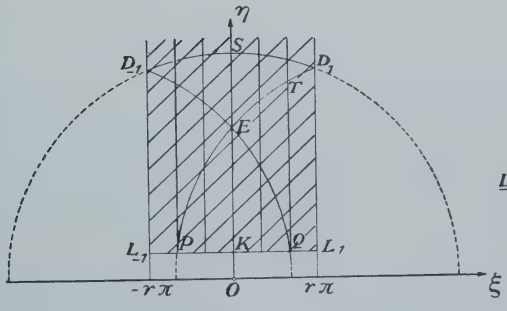


Fig. 10 a

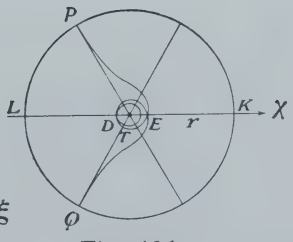


Fig. 10 b

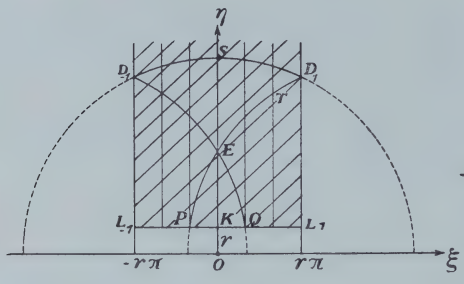


Fig. 11a

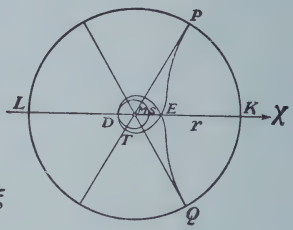


Fig. 11b

8. Die geodätischen Linien der Pseudosphäre selbst ergeben sich also aus den Kurven der Figuren (6b)—(11b), wenn diese Kurven in der Richtung der Z-Achse auf die eine und die andere Hälfte der Pseudosphäre projiziert werden.

Über eine Aufgabe der konformen Abbildung

Von Professor Dr. J. Sommer

Es ist bekannt, welche Bedeutung die konforme Abbildung zweier ebener begrenzter Bereiche aufeinander besitzt für viele Aufgaben der Mechanik, z. B. für die Probleme der Strömungsphysik und der Elastizität. Wenn man jedoch von den Untersuchungen über Kartenprojektionen absieht, so begegnet man in der technisch-wissenschaftlichen Literatur viel seltener der Aufgabe, irgend zwei analytisch definierte Flächen, oder zwei Flächenstücke konform aufeinander abzubilden. Diese Aufgabe ist ganz allgemein von J. H. Lambert, J. L. de Lagrange und C. F. Gauss[1]) gelöst worden.

Die nachfolgende Aufgabe ist von technischer Seite, zur Bestimmung des Propellerwiderstandes gestellt worden und das mag ihre Behandlung an dieser Stelle rechtfertigen, zumal sich neue, allgemeiner interessante Resultate hierbei ergeben.

Aufgabe. Die windschiefe Schraubenfläche, die durch Schraubung einer Halbgeraden senkrecht zur Achse erzeugt wird, auf die Halbebene konform so abzubilden, daß die Achse der Fläche und die Begrenzungsgerade der Halbebene, sowie die unendlich fernen Punkte der Fläche und der Halbebene einander entsprechen.

Die Schraubenfläche ist zugleich Minimalfläche und führt darum den Namen Minimalschraubenfläche.

Die Schraubenfläche sei bezogen auf ein räumliches rechtwinkliges Koordinatensystem ξ, η, ζ, oder mit den Zylinderkoordinaten ξ, r, φ, und zwar falle die Achse der Schraubenfläche mit der ξ-Achse zusammen; außerdem liege die $+\eta$-Achse auf der Fläche. Dann lautet ihre Parameterdarstellung:

$$\xi = \frac{h}{2\pi}\varphi \quad , \quad \eta = r\cos\varphi \quad , \quad \zeta = r\sin\varphi .$$

Man kann r, φ als Gaussische Flächenkoordinaten ansehen, wobei $r \geqq 0$ ist und φ zwischen $-\infty$ und $+\infty$ sich bewegt.

h ist die Ganghöhe der Schraubenfläche, ferner sei zur Abkürzung $k = \frac{h}{2\pi}$ geschrieben.

Auch für die Halbebene, auf welche abgebildet werden soll, sei ein rechtwinkliges Koordinatensystem x, y zugrunde gelegt. Die x-Achse möge mit der ξ-Achse zusammenfallen und zugleich ihr in der Abbildung entsprechen.

Eine ein-eindeutige, stetige Abbildung der Schraubenfläche auf die Halbebene, oder bequemer der Ebene auf die Fläche, ist nun gegeben durch die Beziehungen

$$r = r\,(x, y), \qquad \varphi = \varphi\,(x, y),$$

[1]) Siehe z. B. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften Nr. 54 und 55. Ferner zu vergl. die Lösung nach den Methoden der Flächentheorie etwa in: L. Bianchi, Differentialgeometrie. Kap. III, § 40, 41.

wenn und soweit r (x, y), φ (x, y) umkehrbar eindeutige, stetige Funktionen ihrer Argumente sind. Diese Funktionen r, φ sind zu bestimmen.

Dazu sei nun $d\sigma$ ein Linienelement auf der Schraubenfläche, das von dem Punkt $(\xi, \eta, \zeta) = (r, \varphi)$ ausgeht und ds sei sein Abbild in der Ebene, ausgehend von dem Bildpunkt (x, y), also:

$$d\sigma^2 = d\xi^2 + d\eta^2 + d\zeta^2 = dr^2 + (r^2 + k^2)\, d\varphi^2, \quad ds^2 = dx^2 + dy^2.$$

Dann besteht eine notwendige und hinreichende Bedingung für die Konformität der Abbildung darin, daß der Quotient $\frac{d\sigma}{ds}$ unabhängig ist von der Richtung von $d\sigma$ bzw. ds. Oder es muß $\frac{d\sigma}{ds}$ eine im Endlichen eindeutige und stetige Funktion der Stelle (r, φ) bzw. ihres Bildes (x, y) sein. Wenn man daher $r = r\,(x, y)$, $\varphi = \varphi\,(x, y)$ in $d\sigma$ einführt, so muß also eine Funktion $Q\,(x, y)$ existieren, daß $d\sigma^2 = Q\, ds^2$ wird. Mit den für partielle Differentialquotienten üblichen Bezeichnungen $\frac{\partial r\,(x, y)}{\partial x} = r_x$ etc., wo die Argumente weggelassen seien, wenn kein Zweifel besteht, hat man nach Ausrechnung von $d\sigma^2$:

$$[r_x^2 + (r^2 + k^2)\, \varphi_x^2]\, dx^2 + 2\, [r_x r_y + (r^2 + k^2)\, \varphi_x \varphi_y]\, dx\, dy + [r_y^2 + (r^2 + k^2)\, \varphi_y^2]\, dy^2 = Q\,(x, y)\, [dx^2 + dy^2]$$

und diese Identität liefert für r und φ die zwei getrennten Differentialbeziehungen:

$$(r^2 + k^2)\, \varphi_x \varphi_y = -\, r_x r_y$$
$$r_x^2 + (r^2 + k^2)\, \varphi_x^2 = r_y^2 + (r^2 + k^2)\, \varphi_y^2 = Q\,(x, y).$$

Oder, wenn man nach φ_x, φ_y auflöst und die hierbei auftretenden Quadratwurzeln stets mit dem positiven Vorzeichen nimmt:

$$(1) \qquad \left| \begin{array}{l} \varphi_x = -\, \dfrac{r_y}{\sqrt{r^2 + k^2}} \\ \varphi_y = \dfrac{r_x}{\sqrt{r^2 + k^2}} \end{array} \right.$$

Durch Elimination der Funktion φ, mittels der Gleichung $\frac{\partial \varphi_x}{\partial y} = \frac{\partial \varphi_y}{\partial x}$ erhält man für r die Differentialgleichung:

$$(2a) \qquad \frac{\partial}{\partial x} \frac{r_x}{\sqrt{r^2 + k^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{r_y}{\sqrt{r^2 + k^2}} = 0,$$

also nach Differentation und Multiplikation der linken Seite mit $(r^2 + k^2)^{\frac{3}{2}} \neq 0$:

$$(2) \qquad \left(\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2}\right)(r^2 + k^2) - r\left(\left(\frac{\partial r}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial y}\right)^2\right) = 0.$$

Nach der Bestimmung von r (x, y) aus dieser Gleichung, evtl. unter Benutzung gegebener Randbedingungen, folgt φ aus den Gleichungen (1), da:

$$\varphi(x,y) = \int \frac{-r_y\,dx + r_x\,dy}{\sqrt{r^2+k^2}}$$

ist, wo der Integrand ein exaktes Differential darstellt.

Die Differentialgleichung (2) ist linear, vom elliptischen Typus. Ihre Charakteristiken in der x-y-Ebene sind (wie üblich $i = \sqrt{-1}$ gesetzt):

$$x + iy = C_1 \quad \text{und} \quad x - iy = C_2.$$

Faßt man jetzt die x-y-Ebene zugleich als die Ebene der komplexen Zahlen auf und führt in der Gleichung (2) die neuen Veränderlichen $z = x + iy$, und $\bar{z} = x - iy$ ein, indem r als Funktion dieser beiden angesehen wird, so ergibt sich statt dessen die Gleichung:

$$\frac{\partial^2 r}{\partial z\,\partial \bar{z}}(r^2+k^2) - r\,\frac{\partial r}{\partial z}\,\frac{\partial r}{\partial \bar{z}} = 0, \tag{3}$$

und diese Gleichung kann man übersichtlicher wie folgt schreiben:

$$\frac{\partial \operatorname{Log}\frac{\partial r}{\partial \bar{z}}}{\partial z} - \frac{\partial \operatorname{Log}\sqrt{r^2+k^2}}{\partial z} = 0. \tag{4}$$

Das ist eine Gleichung, die man sofort integrieren kann. Es folgt als Zwischenintegral der Gleichung (3)

$$\frac{\partial r}{\partial \bar{z}} = \sqrt{r^2+k^2}\; f'_2(\bar{z}), \tag{5}$$

worin $f'_2(\bar{z})$ die Ableitung einer willkürlichen Funktion $f_2(\bar{z})$ bezeichnen möge. Durch Vertauschung von z und $\bar{z}$ in den Gleichungen (3) und (4) ergibt sich sodann als zweites Zwischenintegral, mit analoger Bedeutung von $f'_1(z)$:

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \sqrt{r^2+k^2}\; f'_1(z). \tag{5a}$$

Somit ist

$$dr = \sqrt{r^2+k^2}\;(f'_1(z)\,dz + f'_2(\bar{z})\,d\bar{z}),$$

aus welcher Gleichung nach der Integration folgt:

$$\operatorname{Log}(r + \sqrt{r^2+k^2}) = f_1(z) + f_2(\bar{z}),$$

bzw.

$$r + \sqrt{r^2+k^2} = e^{f_1(z)+f_2(\bar{z})}$$

und

$$2r = e^{f_1(z)+f_2(\bar{z})} - k^2 e^{-f_1(z)-f_2(\bar{z})}. \tag{6a}$$

Setzt man $k = e^{-c}$ und denkt sich übrigens diese Konstante c in die willkürlichen Funktionen $f_1(z) + f_2(z)$ einbezogen, so ergibt sich jetzt das allgemeine Integral der Differentialgleichung (2) aus (6a) nach der Ersetzung der Veränderlichen z und $\bar{z}$ durch $x + iy$ bzw. $x - iy$ zu:

$$2r = k\,(e^{f_1(x+iy)+f_2(x-iy)} - e^{-f_1(x+iy)-f_2(x-iy)}) \tag{6}$$

und in anderer Bezeichnung mit Hyperbelfunktionen

$$r = k \sin h\,(f_1(z) + f_2(\bar{z})). \tag{7}$$

Nach einfacher Rechnung findet man ferner, dazu entsprechend:

$$i\varphi = f_1(z) - f_2(\bar{z}). \tag{8}$$

Damit man eine reelle Abbildung der Schraubenfläche auf die Ebene erhält, muß $f_1(x+iy) + f_2(x-iy)$ reell und $f_1(x+iy) - f_2(x-iy)$ rein imaginär ausfallen. Sollen außerdem die unendlich fernen Punkte der Fläche und der Ebene einander zugeordnet sein, dann darf r wegen der Eindeutigkeit der Abbildung nur unendlich werden für $x = \infty$, $y = \infty$, während φ für solche Werte unbestimmt bleibt. Die Funktion r darf also z. B. keinen Nenner aufweisen, der für reelle, endliche Werte x, y verschwindet, oder sie darf keinen Faktor haben, der für solche Werte unendlich würde, wie etwa der Logarithmus einer reellen Funktion. Indem man die Funktionen f_1, f_2 spezialisiert und durch vorgeschriebene Funktionen ersetzt, erhält man beliebig viele konforme Abbildungen.

Nur um ein Beispiel anzuführen, sei etwa:

$$f_1(x+iy) = \frac{1}{2}(1-i)\,C(x+iy); \quad f_2(x-iy) = \frac{1}{2}(1+i)\,C(x-iy),$$

dann wird

$$\begin{cases} r &= k \sin h\,(C(x+y)) \\ \varphi &= -C(x-y), \end{cases}$$

womit dann eine Abbildung gegeben ist, durch die die Orthogonalschar $r = C_1$, $\varphi = C_2$ auf der Schraubenfläche, d. h. die gewöhnlichen Schraubenlinien und die dazu rechtwinkligen Erzeugenden auf die orthogonalen Geradenscharen $x+y = c_1$, $x-y = c_2$ eindeutig bezogen werden. Der Achse der Schraubenfläche $r = 0$ entspricht $x+y = 0$, die sogenannte zweite Mediane des Koordinatensystems. Der x-Achse $y = 0$ der Ebene entspricht auf der Fläche eine Kurve, deren Gleichung in den Gaussischen Koordinaten:

$$r = -k \sin h\ \varphi$$

ist. Dieselbe projiziert sich auf die η-ζ-Ebene in eine Art Doppelspirale.

Übrigens sind mit einer solchen ganz speziellen Abbildung, in Verbindung mit der konformen Abbildung zweier ebener Bereiche aufeinander, auch schon alle Aufgaben gelöst, die verlangen, daß ein gegebener berandeter Bereich B auf der Fläche in einen berandeten Bereich F der Ebene, bei Zuordnung der Ränder abgebildet werden soll. Diese Aufgabe ist gelöst, wenn der Bereich b, in den der gegebene Bereich B durch die spezielle Abbildung übergeht, in F abbildbar ist.

Um nun aus den Formeln (7) und (8) die Lösung der eingangs gestellten Aufgabe zu erhalten, ist zu verlangen, daß für $y = 0$ und alle beliebigen Werte x stets $r = 0$ wird. Es muß also identisch in x:

$$0 = k\,(e^{f_1(x) + f_2(x)} - e^{-f_1(x) - f_2(x)})$$

sein, was dasselbe ist, wie

$$f_1(x) + f_2(x) = 0. \tag{9}$$

Eine analytische Funktion, wie das f_1 und f_2 sein sollen, ist aber bestimmt, wenn sie für die Stellen irgend eines Linienstückes gegeben ist. Darum gilt die Gleichung (9) auch für komplexe Werte von x, oder es ist weiter

$$f_2(x-iy) = -f_1(x-iy).$$

Die vorgeschriebene Randbedingung $r = 0$ für $y = 0$ reduziert also das System von zwei willkürlichen Funktionen in den Abbildungsformeln (7), (8) auf eine einzige. Man erhält als Lösung der gestellten Aufgabe die Schlußformeln:

$$(10) \qquad \begin{cases} r = k \sin h\,(f_1(x+iy) - f_1(x-iy)) \\ i\varphi = f_1(x+iy) + f_1(x-iy), \end{cases}$$

und man gelangt jedenfalls zu einer reellen Abbildung, wenn man, unter $f(z)$ eine analytische Funktion mit reellen Koeffizienten verstanden, $f_1(z) = i f(z)$ setzt. Dann ist:

$$(11) \qquad \begin{cases} r = k \sin h\,(i f(x+iy) - i f(x-iy)) \\ \varphi = f(x+iy) + f(x-iy), \end{cases}$$

wofür man auch schreiben kann:

$$(11a) \qquad \begin{cases} r = i k \sin\,(f(x+iy) - f(x-iy)) \\ \varphi = f(x+iy) + f(x-iy). \end{cases}$$

Das lineare Abbildungsverhältnis für die Stelle (r, φ) oder (x, y) ist hierfür:

$$(12) \qquad \frac{d\sigma}{ds} = \pm 2k \cos\,(f(x+iy) - f(x-iy)) \cdot \sqrt{f'(x+iy)\, f'(x-iy)},$$

und somit das zugehörige Verhältnis entsprechender Flächenelemente dw auf der Fläche und do in der Ebene:

$$(13) \qquad \frac{dw}{do} = 4k^2 \cos^2\,(f(x+iy) - f(x-iy))\, f'(x+iy)\, f'(x-iy).$$

Man kann die Frage stellen, wie die Funktion f beschaffen sein muß, damit $\frac{d\sigma}{ds}$ oder $\frac{dw}{do}$ einer gegebenen Funktion $g(x, y)$ oder $G(r, \varphi)$ gleich ist, speziell daß $g(x, y) = K$, wo K eine reelle Konstante.

Schreibt man

$$f(x+iy) = \chi(x, y) + i\,\psi(x, y) = \chi + i\,\psi,$$

so ist

$$(14) \qquad \begin{cases} f'(x+iy) = \chi_x + i\,\psi_x \\ f'(x-iy) = \chi_x - i\,\psi_x \end{cases}$$

also wäre im Fall $\frac{dw}{do} = K$

$$4k^2 \cos^2 2i\,\psi(x, y)\,(\chi_x^2 + \psi_x^2) = K.$$

Nach den Cauchy-Riemannschen Gleichungen ist aber $\chi_x = \psi_y$, ferner ist $\cos i\alpha = \cos h\,\alpha$, folglich besteht für $\psi(x, y)$ die partielle Differentialgleichung

$$4k^2 \cos h^2\,(2\psi(x, y))\,(\psi_x^2 + \psi_y^2) = K,$$

außer der Gleichung, die sie als Imaginärteil einer komplexen Funktion befriedigt:

$$\psi_{xx} + \psi_{yy} = 0.$$

Substituiert man in ψ anstatt x, y die neue Veränderliche $z = x + iy$, $\bar{z} = x - iy$, so gehen die beiden Differentialgleichungen über in:

$$4\,k^2 \cos h^2 (2\,\psi\,(z,\,\bar{z}))\, 4\,\frac{\partial\psi}{\partial z}\frac{\partial\psi}{\partial \bar{z}} = K$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial z\,\partial\bar{z}} = 0,$$

und es ist wegen der zweiten dieser Gleichungen ψ von der Form $\psi\,(z,\,\bar{z}) = \psi_1\,(z) + \psi_2\,(\bar{z})$, womit dann die erste Gleichung wird:

$$16\,k^2\,\psi_1'\,(z)\cdot\psi_2'(\bar{z}) = \frac{K}{\cos h^2\,2\,(\psi_1\,(z) + \psi_2\,(\bar{z}))}.$$

Nun ist die linke Seite dieser Gleichung ein Produkt einer ganzen Funktion von z allein mit einer ganzen Funktion von $\bar{z}$, während die rechte Seite nicht zerlegbar ist. Die Gleichungen für ψ haben eben keine gemeinsame Lösung und so ist aus den Eigenschaften der Differentialgleichungen bewiesen, daß es keine konforme Abbildung der Schraubenfläche auf die Halbebene gibt mit konstantem Verhältnis der Längen und Flächen.

Es möge noch die Aufgabe gelöst werden, den Inhalt der Fläche in der Ebene zu berechnen, in welche ein gegebener einfach berandeter Bereich der Schraubenfläche abgebildet wird.

Das Flächenelement auf der Schraubenfläche, ausgedrückt in den Koordinaten r, φ, ist

$$dw = \sqrt{r^2 + k^2}\; dr\; d\varphi, \tag{15}$$

und do ergibt sich aus (13), wenn man von den Koordinaten x, y auf die r, φ zurückgeht. Dazu bemerkt man zunächst nach (11a), daß

$$r^2 + k^2 = k^2 \cos^2 (f(x+iy) - f(x-iy)) \tag{16}$$

ist. Ferner ergibt sich aus der Gleichung (11):

$$f(x+iy) - f(x-iy) = -i\,\mathrm{Log}\left(\frac{r}{k} + \sqrt{\left(\frac{r}{k}\right)^2 + 1}\right)$$

und dies in Verbindung mit der zweiten Gleichung (11) ergibt:

$$f(x \pm iy) = \frac{\varphi}{2} \mp \frac{i}{2}\,\mathrm{Log}\left(\frac{r}{k} + \sqrt{\left(\frac{r}{k}\right)^2 + 1}\right)$$

Zur Abkürzung möge die neue Veränderliche

$$R = \mathrm{Log}\left(\frac{r}{k} + \sqrt{\left(\frac{r}{k}\right)^2 + 1}\right)$$

eingeführt werden, wo $r \geq 0$, $R \geq 0$ und daher R und r eindeutig durch einander bestimmt sind. Dann ist schließlich:

$$\left|\begin{array}{l} f(x+iy) = \dfrac{\varphi}{2} - i\,\dfrac{R}{2} = \bar{u} \\ f(x-iy) = \dfrac{\varphi}{2} + i\,\dfrac{R}{2} = u. \end{array}\right. \tag{17}$$

Die, für den abzubildenden Bereich vorhandenen, inversen Funktionen mögen geschrieben werden:

$$x + iy = F(\bar{u}),\; x - iy = F(u).$$

Dann ist

$$f'(z) = \frac{d\bar{u}}{dz} = \frac{1}{\frac{dz}{d\bar{u}}} = \frac{1}{F'(\bar{u})}; \text{ und } f'(\bar{z}) = \frac{1}{F'(u)}. \tag{18}$$

Setzt man die Ausdrücke aus den Gleichungen (15), (16) und (18) in die Gleichung (13) ein, so bleibt:

$$do = \frac{1}{4} F'(\bar{u})\, F'(u)\, \frac{1}{\sqrt{r^2 + k^2}}\, dr\, d\varphi,$$

oder wenn man auch hier R statt r einführt:

$$do = k^2 F'\left(\frac{\varphi}{2} - i\frac{R}{2}\right) F'\left(\frac{\varphi}{2} + i\frac{R}{2}\right) d\frac{R}{2}\, d\frac{\varphi}{2}.$$

Setzt man:

$$F\left(\frac{\varphi}{2} + i\frac{R}{2}\right) = X\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right) + i\Psi\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right),$$

so ist analog wie früher:

$$F'(u) = X_{\frac{\varphi}{2}} + i\Psi_{\frac{\varphi}{2}}$$

und:

$$F'(u)\, F'(\bar{u}) = X^2_{\frac{\varphi}{2}} + \Psi^2_{\frac{\varphi}{2}} = \Psi^2_{\frac{R}{2}} + \Psi^2_{\frac{\varphi}{2}},$$

daher man do wie folgt schreiben kann:

$$do = k^2 \left(\Psi^2_{\frac{\varphi}{2}} + \Psi^2_{\frac{R}{2}}\right) d\frac{R}{2}\, d\frac{\varphi}{2}. \tag{19}$$

Das auf der Schraubenfläche gelegene und abzubildende Flächenstück Ω sei z. B. begrenzt durch die Linien $r = r_1$, $r = r_2$, denen $R = R_1$ und $R = R_2$ entspricht, und $\varphi = \varphi_1$, $\varphi = \varphi_2$, so ist:

$$o = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{R_1}^{R_2} k^2 \left(\Psi^2_{\frac{\varphi}{2}} + \Psi^2_{\frac{R}{2}}\right) d\frac{R}{2}\, d\frac{\varphi}{2}. \tag{20}$$

Aus dieser Formel läßt sich noch eine bemerkenswerte Folgerung ableiten.

Damit der Inhalt o zu einem gegebenen Bereich B auf der Schraubenfläche möglichst klein wird, natürlich verschieden von Null, weil es sich um nicht ausgeartete Abbildung handeln soll, muß die Funktion Ψ der partiellen Differentialgleichung genügen:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \frac{\varphi^2}{2}} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \frac{R^2}{2}} = 0, \tag{21}$$

wie das in der Variationsrechnung gezeigt wird. Nun ist aber $i\Psi$ der imaginäre Teil einer komplexen Funktion und befriedigt ihrer Definition gemäß die Gleichung

(21) von vornherein. Nachdem Ψ für einen Bereich B bestimmt ist, ergibt sich X aus dem exakten Differential:

$$d X = \frac{\partial \Psi}{\partial \frac{R}{2}} d\frac{\varphi}{2} - \frac{\partial \Psi}{\partial \frac{\varphi}{2}} d\frac{R}{2}$$

und es ist $x = X$, $y = \Psi$.

Nimmt man also für den Rand des Bereiches B die Randwerte $y = \Psi\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right)$ in geeigneter Weise (nach Voraussetzung nicht konstant) an, z. B. einfach als stetige analytische Funktion des Ortes, und bestimmt eine eindeutige stetige und zweimal differentierbare Funktion Ψ, die in B der Gleichung (21) genügt und auf dem Rand die gegebenen Werte annimmt, sucht dazu $x = X$, was bis auf eine Konstante bestimmt ist, so ergeben $x = X\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right)$ $y = \Psi\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right)$ eine konforme Abbildung des Bereiches B auf einen möglichst kleinen Bereich b der x-y-Ebene.

Der Inhalt des Bildbereiches ändert sich mit der Randwertverteilung der Werte von y.

Unser Satz zeigt eine der Bedingungen, unter welchen die Frage nach einem kleinsten Abbild eines gegebenen Bereiches überhaupt erst zu einer bestimmten wird. Einen kleinsten Bildbereich > 0 schlechthin gibt es nicht. Selbstverständlich kann man aber die Rollen von $y = \Psi$ und $x = X$ miteinander vertauschen.

Die noch fehlenden Werte von x (oder wenn x gegeben wäre, von y) für den Rand ergeben sich aus den Werten von $X\left(\frac{\varphi}{2}, \frac{R}{2}\right)$ im Innern von B durch stetigen Übergang.

Unter Verwendung bekannter Resultate der Untersuchungen über das Dirichletsche Randwertproblem lassen sich leicht Beispiele zu dem letzten Ergebnis ausrechnen, auf die hier nicht mehr eingegangen werden kann.

Zum Schluß möge bloß eine ganz einfache, geometrisch unmittelbar einleuchtende Lösung der eingangs gestellten Aufgabe hingeschrieben werden, die sich durch die Spezialisierung der Funktion f in den Gleichungen (11) ergibt.

Ist a eine Konstante und setzt man:

$$f(x + i y) = -\frac{a}{2}(x + i y),$$

so wird

$$r = k \sin h (a y) \quad \varphi = -a x \tag{22}$$

und wiederum speziell mit $a = -\frac{1}{k}$:

$$r = k \sin h\left(-\frac{y}{k}\right) \quad \varphi = \frac{x}{k}, \tag{23}$$

oder aufgelöst, wobei $k\varphi = \xi$ geschrieben wird:

$$(23a) \qquad y = -k \operatorname{Log}\left(\frac{r}{k} + \sqrt{\left(\frac{r}{k}\right)^2 + 1}\right) = -k R, \quad x = \xi$$

samt dem Längenverhältnis der zusammengehörigen Linienelemente

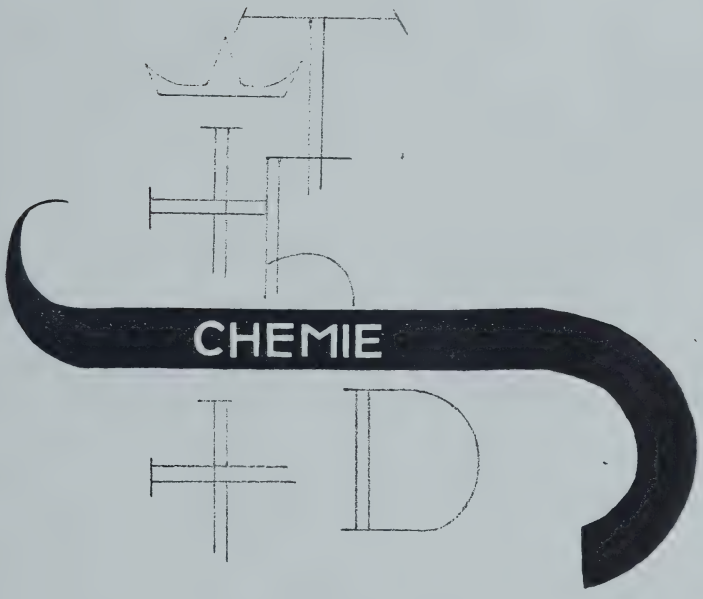
$$(24) \qquad \frac{d\sigma}{ds} = \cos h \left(-\frac{y}{k}\right).$$

Hierdurch wird die Schraubenfläche, so wie sie früher begrenzt wurde, mit $r \geq 0$, auf die untere Halbebene $y \leq 0$ abgebildet. Den Erzeugenden der Schraubenfläche $\xi = C$ entsprechen die Parallelen zur Ordinatenachse $x = C$ und den Schraubenlinien $r = r_1$ entsprechen die Parallelen zur x-Achse $y = -kR_1$.

Der unendlich fernen Schraubenlinie $r = \infty$ entspricht die unendlich ferne Gerade der Halbebene und ebenso entsprechen sich $\xi = \infty$, $x = \infty$.

Bei der Abbildung der g e s a m t e n Schraubenfläche, wobei r zwischen $-\infty$ und $+\infty$ sich bewegt, würde die Formeln (11) und speziell (22), (23) eine Abbildung auf die ganze Ebene ergeben und man hätte diese nachträglich auf eine Halbebene abzubilden.

Da die Schraubenfläche eine Minimalfläche ist, die auf das Katenoid abgewickelt werden kann, so ist im vorstehenden zugleich die Aufgabe gelöst, das Katenoid auf die Ebene konform abzubilden.


CHEMIE

Probleme der Jodforschung

Von Professor Dr. Engelhardt Glimm

Seit der Auffindung des Jods in der Schilddrüse durch Baumann sind jetzt fast 35 Jahre vergangen. Eine sehr bedeutende Anzahl von Untersuchungen ist seitdem über das Vorkommen des Jods im Tier- und Menschenkörper und über dessen Bedeutung angestellt worden. Sehr zahlreich sind auch die Feststellungen über die Verteilung des Jods im Boden und in den Gesteinen und über die Folgen verschiedenen Jodgehalts des Bodens für das Wachstum und Gedeihen der auf ihm wachsenden Pflanzen.

Das große Interesse, das diesen Fragen entgegengebracht wird, ist nicht nur ein wissenschaftliches, sondern von großer praktischer Bedeutung. Glaubte man doch lange Zeit, Jodmangel in der Nahrung für die Entstehung des Kropfes verantwortlich machen zu können, eine Theorie, die bislang weder völlig bewiesen, noch recht widerlegt werden konnte. Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, daß das Jod eine eigentümliche Reizwirkung im Organismus auszuüben vermag, eine solche, wie sie dem Chemiker auf seinem Gebiet unter dem Begriff der Katalyse geläufig ist.

Der Gehalt der Böden an Jod hat für das Thema Jod als biogenes Element nur insofern Interesse, als der Jodgehalt des Bodens bestimmend auf den Jodreichtum der auf ihm wachsenden Pflanzen sein kann. Der Gehalt des Bodens an Jod ist außerordentlich verschieden. Im allgemeinen scheint bei der Verwitterung des festen Gesteins zu Schutt und Erde das Jod im Boden festgehalten zu werden, so daß der entstehende Ackerboden prozentual reicher an Jod ist als das ursprüngliche Gestein. Sehr reich an Jod sind manche Sedimente. Diese Sedimente enthalten das Jod, das Meerespflanzen und -tiere aus dem jodreichen Meere in bedeutendem Maße aufgespeichert haben, und das ihre verwesenden Körper an den Meeresgrund wieder abgeben.

Über die Bedeutung des Jods für die Pflanze ist man sich noch völlig im Unklaren. Es scheint festzustehen, daß die Pflanzen, die auf jodreichem Boden wachsen, jodreicher werden als andere. Ob diese Vermehrung der Jodzufuhr aber eine Begünstigung für Wachstum und Fortpflanzung bedeutet, ist gänzlich umstritten. Nach Versuchen Stocklasas[1]) an Zuckerrüben soll das der Fall sein. Dieser Autor hält daher die Düngung der Rüben mit jodhaltigem Chile-Salpeter der Düngung mit synthetischem, nicht jodhaltigem Düngemittel für überlegen. Diese Angaben werden von verschiedener Seite bestätigt, von anderer widerlegt. Nun ist die Frage nach der biogenen Wirkung des Jods für die Pflanzenwelt durch Düngungsversuche dieser Art auch kaum zu entscheiden. Bei dem ubiquitären Vorkommen des Jods ist bei allen diesen Versuchen stets die Frage gestellt gewesen, ob eine Mehrzufuhr von Jod in dieser oder jener Hinsicht wirksam sei, nicht aber, ob die geringen Mengen, die außer bei ungewöhnlichen Maßnahmen

den Pflanzen im gebotenen Bodenmaterial stets zur Verfügung stehen, notwendig sind oder nicht. Zu beachten ist bei der Auswertung des bisher vorliegenden Versuchsmaterials, daß die Pflanze das künstlich und möglicherweise in starkem Uberschuß zugeführte Jod zum größten Teil in den Blättern abscheidet, und daß das Jod vor dem Beginn des Welkens und Ablösens des Blattes nicht von der Pflanze zurückgenommen, sondern — als anscheinender Ballast — mit dem verwelkten Blatt abgestoßen wird. Die gleiche Erscheinung ist bei vielen Meerespflanzen zu beobachten. Sie lagern Jod gerade in denjenigen Organen ab, die als Stapelplätze für Stoffwechselprodukte dienen. Von manchen Meerestieren, deren Panzer oder Schale besonders jodreich ist, dürfte das gleiche zu sagen sein. Diese Stapelung des Jods dient also in den genannten Fällen nicht zu seiner späteren Verwendung, sondern zur Unschädlichmachung eines Ballaststoffes.

Bei einem Überblick über die Forschung des Jods als biogenes Element ist hervorzuheben, daß — wegen der Unzulänglichkeit unserer derzeitigen chemisch-analytischen und pharmakologischen Methoden — eine Scheidung des Jodstoffwechsels schlechthin von dem des aktiven Jods noch nicht erfolgt ist, auch noch nicht versucht werden konnte. Es erscheint aber doch notwendig, auf das Wünschenswerte dieser Trennung nachdrücklich aufmerksam zu machen. Vom tierischen Organismus wissen wir, daß ein Teil des Jods in besonders aktiver Form auftritt als Hormon der Schilddrüse, als Thyroxin. Bei den Untersuchungen und Fragestellungen über die Beziehungen der Schilddrüsenerkrankungen zum Jodstoffwechsel ist bislang ausschließlich versucht worden, aus dem Gehalt der Schilddrüse oder anderer Organe resp. des Bluts an Jod schlechthin Rückschlüsse auf die Bedeutung des Jods für die Funktion der Schilddrüse zu ziehen. Nicht das Jod selbst ruft die typische Schilddrüsenwirkung hervor, sondern ein organisches Jodderivat, dessen pharmakologische Eigenschaften sich von denen des Jods ebenso weit unterscheiden wie die des Phosphors von seinen Verbindungen. — Wie wenig geklärt die Verhältnisse auf diesem Gebiete sind, erhellt aus der eigentümlichen Tatsache, daß künstliche Jodzufuhr sowohl bei Kropfkrankheit (also Erkrankung der Schilddrüse mit Unterfunktion), als bei Basedow (Erkrankung der Schilddrüse mit Überfunktion) zu Heilzwecken mit gutem Erfolge angewendet wird. Im ganzen scheint nur soviel festzustehen, daß die pharmakologische Wirkung des Jods aus zwei Komponenten sich zusammensetzt, der Wirkung des Jods selbst und der Wirkung des aus dem Jod gebildeten Thyroxins.

Bei der Betrachtung des Vorkommens von Jod in der Pflanze dürfte die Suche nach aktivem Jod ebenfalls berechtigt und die Frage zu stellen sein: enthält die Pflanze Thyroxin? In der Pflanze einen Stoff zu vermuten, der bisher nur aus Organen von Säugetieren isoliert worden ist, und diesen zur Erfüllung komplizierter Aufgaben dient, möchte als allzu kühner Gedanke erscheinen. Er ist es doch nicht, wenn man die Resultate der bisherigen Hormonforschung betrachtet. Schon vor mehreren Jahren hat Collip aus pflanzlichem Material blutzuckersenkende Stoffe isoliert. Diese sind dem Hormon des Pankreas, dem Insulin, in pharmakologischer Wirkung und chemischen Eigenschaften nahe verwandt. Noch auffallender ist es, in pflanzlichem Material (Hefe und Weizenkeimlingen)[2]) Stoffe zu finden, die das Ovar des Säugetieres in einer zur Erfüllung seiner spezifischen Aufgaben ent-

sprechenden wechselnden Menge produziert. Das weibliche Sexualhormon wird im Säugetierkörper normalerweise nur im Ovar gebildet, es trägt dazu bei, den Zyklus des weiblichen Lebens zu unterhalten, seine periodische Produktion ist die wichtigste Ursache des periodischen Ablaufs. Dieses weibliche Sexualhormon ist schon in niederen Lebewesen nachzuweisen.

Welche Zwecke diese Hormone in jenen so anders gearteten, auf der untersten Stufe der belebten Welt stehenden Organismen zu erfüllen haben, ist noch unbekannt. Wie gering die Mengen sind, die hormonal wirksam sein können, zeigt die kürzliche Mitteilung von Romeis[3]), daß noch 1/20billionstel Gramm Thyroxin bei 0,8 g schweren Winterpuppen von Papilis podalirius eine Stoffwechselsteigerung von 30—40 % hervorruft.

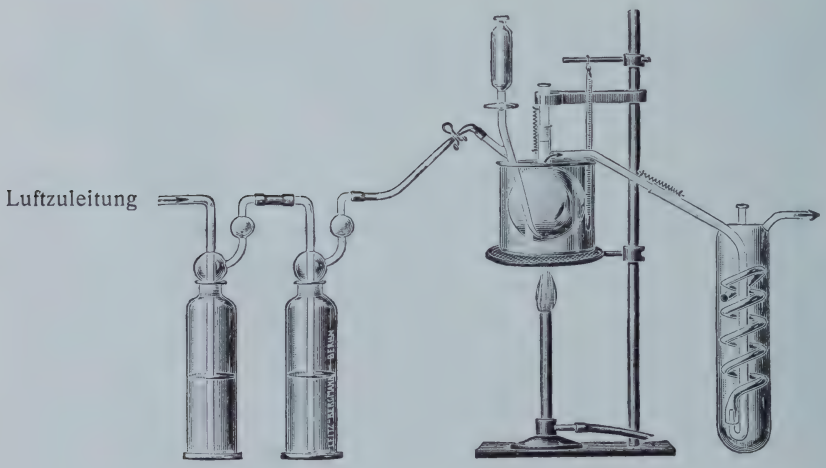
Wenn also die summarische Bestimmung des Jods in den verschiedenen Organen nur bedingten Wert hat, so wurden doch im Chemischen Institut seit etwa zwei Jahren zahlreiche Untersuchungen hierüber ausgeführt. Sie konnten jedenfalls das Problem der Jodmangeltheorie mit entscheiden helfen, für das hiesige medizinische Kreise sich lebhaft interessierten.

Die große Unsicherheit auf dem Gebiet der Jodforschung ist zum Teil durch die Schwierigkeit fast aller und die Unzuverlässigkeit sehr vieler Methoden bedingt. v. Fellenbergs[4]) Methode des alkalischen Aufschlusses in offener Schale wird heute vielfach angewendet. Auch wir haben sie anfänglich benutzt und sie für viele Zwecke ausgezeichnet brauchbar gefunden. Wir haben sämtliche Joduntersuchungen der Schilddrüse nach ihr ausgeführt. Andererseits ist nicht zu verkennen, daß sie ein äußerst subtiles Arbeiten voraussetzt und bei einer Reihe von Untersuchungsgegenständen trotz aller Mühe nicht solche zuverlässigen Resultate liefert, wie sie zur Erforschung dieser schwierigen Zusammenhänge wünschenswert erscheinen. Für diese Fälle, die insbesondere Nahrungsmittel betreffen, haben wir die kürzlich veröffentlichte Pfeiffersche[5]) Methode des Aufschlusses mit konzentrierter Schwefelsäure und Wasserstoffsuperoxyd in geschlossener Apparatur, die leider in der angegebenen Form für uns unbrauchbar war, derart abgeändert, daß sie nun völlig zuverlässige Resultate liefert und auch vom Nichtchemiker mit Erfolg gemeistert werden kann.

Unsere Apparatur besteht aus einem Aufschlußkolben von 150—500 ccm Inhalt in einem Paraffinbad, einer mit 2 bis 3%igen Kalilauge beschickten Energiewaschflasche als Vorlage und zwei einfachen Waschflaschen mit Kalilauge, die dem Aufschlußkolben vorgeschaltet sind. Die Anordnung der Apparatur ist aus der folgenden Zeichnung ersichtlich. Die ausführliche Beschreibung des Arbeitsganges erfolgt an anderer Stelle[6]).

Zum Aufschluß wird die zu untersuchende Substanz je nach ihrem Jodgehalt in einer Menge von 10—30 g in den Aufschlußkolben der zusammengestellten Apparatur gebracht und durch den Tropftrichter soviel konzentrierte Schwefelsäure hinzugefügt, daß die Substanz gut durchfeuchtet wird und von der Schwefelsäure bedeckt ist; für 1 g Trockensubstanz werden etwa 20 ccm Schwefelsäure benötigt. Ist die notwendige Menge der Säure eingelaufen, so wird das Paraffinbad, in dem der Aufschlußkolben steht, auf 60° angeheizt und nun mit der Zugabe

des 30 %igen Wasserstoffsuperoxyds in kleinen Anteilen durch den Tropftrichter begonnen. Sogleich tritt eine Reaktion ein, die durch weitere Zugabe von Wasserstoffsuperoxyd so zu regeln ist, daß die entstehenden Gasblasen niemals stürmisch, sondern in gleichmäßiger Folge die Waschflache durchperlen. Die Verbrennung ist beendet, wenn der Kolbeninhalt ganz farblos und klar geworden ist. Es erfolgt jetzt das Übertreiben des entstandenen Jods aus dem Aufschlußkolben in die Vorlage. Die Temperatur des Paraffinbades wird langsam auf 220—230° gesteigert und zugleich Luft aus einem Gasometer durch die Apparatur gedrückt. Die Luft wird in den beiden, dem Anschlußkolben vorgeschalteten Waschflaschen, mit Kalilauge gewaschen. Das Übertreiben des Jods pflegt in 1 Stunde beendet zu sein.



Es gehen in dieser Zeit durch den Aufschluß nicht zerstörte flüchtige Fettsäuren und viel Wasser in die Vorlage mit hinüber. Das gesamte Jod der zu untersuchenden Probe ist jetzt in die Vorlage übergeführt. Es wird in bekannter Weise nach Eindampfen der wäßrigen Lösung in einer Platinschale durch Alkoholextraktion als Kaliumjodid isoliert und titrimetrisch bestimmt. — Eine größere Reihe von Kontrollanalysen bewies die große Zuverlässigkeit unserer Methode.

Die Schlüsse, die sich aus diesen Untersuchungen in betreff der Jodmangeltheorie ziehen lassen, sind bereits von Dr. E. Liek[7]) veröffentlicht und ausführlich besprochen worden. Uns erscheint an dieser Stelle bemerkenswert, daß der Jodspiegel des Bluts, der bisher als konstanter Wert zu 12 γ % bestimmt worden war, in unserer Gegend wesentlich höher liegt und ganz unerwarteten individuellen Schwankungen unterworfen ist.

In Form einer Tabelle geben wir unsere, gemeinsam mit Herrn Dr. J. Isenbruch gefundenen Werte über den Jodgehalt von Nahrungsmitteln der Danziger Gegend und fügen, um einen Vergleich zu ermöglichen, die seinerzeit von v. Fellenberg mit seiner Methode ermittelten Werte bei.

γ Jod in 1 kg.

Bezeichnung	in Danzig	v. Fellenberg
Kartoffeln frisch	85	35
Kartoffeln getrocknet	340	—
Weizen	70	12—26
		Amerika bis 64
Weizenmehl, Handelsware	38	—
Weizenkleie	210	—
Roggen	50	20—60
Roggenmehl	23	—
Roggenfuttermehl	130	—
Gerste	90	22
Hafer	100	36
Vorzugsmilch Wossitz	90	Wintermilch
„ Zoppot	52	15—45
„ Hansa	60	
Handelsmilch	36	

Die erhaltenen Werte zeigen, daß im Getreidekorn die äußeren Schichten jodreicher sind als der innere Mehlkörper; die Mehle sind daher wesentlich jodärmer als die abfallende Kleie. Es scheinen hier ähnliche Verhältnisse über die Verteilung vorzuliegen wie bei den Vitaminen und den übrigen Mineralbestandteilen.

Literatur

1) Stocklasa, Zeitschr. f. angewandte Chemie. **40.** 27. (1927.)
2) Glimm und Wadehn, Bioch. Zeitschr. **197.** 442. (1928.)
3) Romeis, Naturwissenschaften. **17.** 104. (1929.)
4) v. Fellenberg, Bioch. Zeitschr. **139.** 445. (1923.) **152.** 110. (1924.)
5) Pfeiffer, Bioch. Zeitschr. **201.** 299. (1928.)
6) Glimm und Isenbruch, Bioch. Zeitschr. **207.** 368. (1929.) und Isenbruch, Dissertation.
7) Liek, Das Kropfrätsel. Verlag der Ärztlichen Rundschau. Otto Gmelin, München.

Zweck und Ziel der Bodenbearbeitung

Von Professor Dr. Otto Heuser

Die Bodenbearbeitung besteht in Maßnahmen, die den Boden mechanisch zerkleinern, umlagern, mischen, lockern, gelegentlich auch verdichten. Aus der großen Zahl der hierfür zur Verfügung stehenden Geräte ergeben sich eine ganze Reihe von verschiedenen technischen Möglichkeiten, deren Auswirkung jeweils recht verschieden sein kann. Jede einzelne Maßnahme der Bodenbearbeitung hat ihre technische und bodenkundliche Seite. Technische Gesichtspunkte sind für Form und Bauart des betreffenden Gerätes maßgebend, während für die Wahl des geeigneten Gerätes, der geeigneten Bearbeitungsweise sowie der Aufeinanderfolge bestimmter Geräte die Berücksichtigung der Bodeneigenschaften im weitesten Sinne ausschlaggebend ist.

Man hat den Zustand des Bodens, den wir durch die Bearbeitung anstreben und der die ungestörte Abwicklung aller Vorgänge des Pflanzenwachstums gewährleistet, als B o d e n g a r e bezeichnet. Der Garezustand kann nur bei einem Boden erreicht werden, der sich in guter K r ü m e l s t r u k t u r befindet. Gare und Krümelstruktur sind das Ziel einer jeden Bodenbearbeitung Um bei den einzelnen Maßnahmen folgerichtig vorzugehen, müssen wir uns der Mühe unterziehen, dieses Ziel etwas näher zu definieren.

Krümelstruktur des Bodens ist eine Vorbedingung der Erreichung des garen Zustandes. Unter Krümelstruktur verstehen wir ein Gemisch von gröberen und feineren Bodenteilchen, größeren und kleineren Hohlräumen. Alle wichtigen Vorgänge im Boden können sich dann ungehindert abspielen. Die Erreichung der Krümelstruktur setzt das Vorhandensein von Bestandteilen voraus, die die Fähigkeit besitzen, sich zu größeren Bodenpartikeln zusammenzuballen. Die Erreichung der Krümelstruktur hängt also in gewissen Grenzen von der mechanischen Zusammensetzung des Bodens ab, reine Sandkörner können sich nicht zusammenballen. Es handelt sich aber bei der Herstellung der Krümelstruktur nicht um einen rein physikalischen, sondern um einen kolloidchemischen Vorgang. Es muß kolloidfähiges Material im Boden vorhanden sein, und es müssen auch die elektrolytisch wirkenden Salze vorhanden sein, die die Ausflockung bzw. Zusammenballung bewirken. Kolloidfähiges Material, Träger der Krümelstruktur, sind in erster Linie Ton- und Humuskolloide. Elektrolytisch erweist sich der Kalk besonders wirksam. Kalkgehalt eines Bodens sowie sein Gehalt an kolloidfähigem Ton- und Humusmaterial bestimmen also die Möglichkeit zur Erreichung der Krümelstruktur und damit auch der Garebildung.

In ähnlicher Weise wie zur Erreichung der Krümelstruktur gehören auch zur Garebildung bestimmte Voraussetzungen. Es müssen Stoffe im Boden vorhanden sein, die Träger des Garezustandes sein können, und es müssen auch Kräfte auf

den Boden einwirken, die das Zustandekommen des Vorganges auslösen. Als Träger des Garezustandes ist der Gehalt des Bodens an Humus oder, weiter gefaßt, an organischer Substanz anzusehen. Die Kräfte, die bei der Garebildung mitwirken, sind vorwiegend biologischer Natur.

Mit den biologischen Vorgängen sind die chemischen und physikalischen Vorgänge aufs engste verbunden, sie geben gleichsam den Rahmen ab, innerhalb dessen sich die Bakterientätigkeit ungehindert abspielen kann. Chemische Vorgänge der Verwitterung und Zersetzung anorganischen Materials geben den Bakterien die nötigen Nährstoffe, physikalische Vorgänge sorgen für allgemeine günstige Lebensbedingungen. Fassen wir diese Lebensbedingungen der Bakterien unter einem einheitlichen Gesichtspunkt zusammen, so ergibt sich, daß ein ganz bestimmter Bodenzustand und eine ganz bestimmte Bodenmischung vorhanden sein müssen, damit die Bakterien ihr geeignetes Betätigungsfeld finden. Was die Mischung des Bodens angeht, so handelt es sich im wesentlichen um das Vorhandensein bestimmter Bodenbestandteile, organische Substanz, Kalk, Ton- und Humuskolloide, die in möglichst feiner Verteilung im Bodenmaterial auftreten müssen. Der Zustand kommt zum Ausdruck durch die sogenannte Krümelstruktur des Bodens.

An dem Zustandekommen der Bodengare sind also sehr verschiedene Einflüsse und Kräfte beteiligt, die wir in die verschiedensten Wissensgebiete verweisen müssen. Die einfachste Erklärung ist die, daß Gare eines Bodens denjenigen Zustand bedeutet, in welchem dieser Boden die günstigsten physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften aufweist. Damit ist die Frage jedoch noch nicht erschöpft, da die Faktoren, die zur Garebildung beitragen, wesentlich vielseitiger sind. Eine allgemein gültige Erklärung der Bodengare kann offenbar nur durch eine Zusammenfassung aller in Frage kommenden Wissensgebiete unter einem einheitlichen Gesichtspunkt erfolgen. Wir müssen außerdem zugeben, daß das Zustandekommen der garen Bodeneigenschaft weitgehend als ein Ergebnis der Natur anzusehen ist. Die stets veränderlichen Wirkungen der Atmosphärilien, die dabei eine Rolle spielen, entziehen sich aber einer genauen Beobachtung im Laboratorium. Wir können uns daher nur darauf beschränken, durch wissenschaftliche Forschung die einzelnen Faktoren klarzustellen, die zur Garebildung beitragen, und müssen im übrigen die Erreichung dieses Zustandes dem denkenden Praktiker überlassen. Es gibt auch keinen exakten Maßstab dafür, ob die Bodengare eingetreten ist, ebensowenig wie es einen Maßstab für den Grad des garen Zustandes gibt. Immerhin können wir aber bei verschiedenen Böden gewisse Unterschiede im Ausmaß des Garezustandes erkennen. Wir können auch feststellen, daß verschiedene Böden den Zustand der Gare verschieden schnell erreichen, daß manche mit verhältnismäßig geringen Mitteln in diesen Zustand übergeführt werden und daß andere selbst mit einem großen Aufwand an Bodenbearbeitungsmaßnahmen nicht zur Bodengare gebracht werden können.

Zur Erklärung dieser Zusammenhänge müssen wir zunächst festhalten, daß Bodengare nicht „Eigenschaft“, sondern „Zustand“ bedeutet. Ein Zustand, der zwar von den Eigenschaften des Bodens in gewisser Begrenzung abhängig ist,

der jedoch innerhalb dieser Begrenzung von jedem Boden erreicht werden kann. Zur Erreichung dieses Zustandes sind bestimmte auf den Boden einwirkende Kräfte erforderlich, sobald diese Kräfte in ihrer Wirkung nachlassen, geht auch der Zustand der Bodengare wieder verloren.

Wir unterscheiden eine Bearbeitungsgare und eine Beschattungsgare. Die erstere bildet sich unter dem Einfluß zweckmäßiger Bodenbearbeitungsmaßnahmen, die letztere entsteht unter Bedeckung mit lebendem oder totem Pflanzenmaterial. Obwohl wir demnach auf sehr verschiedenen Wegen zu dem garen Zustand gelangen können, besteht doch eine weitgehende Übereinstimmung zwischen Bearbeitungsgare und Beschattungsgare. Die Gare ist eine Art Selbstauflockerung des Bodens, wobei die natürlichen Zersetzungsprozesse der darin enthaltenen organischen Substanz eine besonders große Rolle spielen. Wir können diesen Vorgang durch mechanische Bearbeitung fördern, ebenso wie eine Beschattung des Bodens durch Erhaltung der Lockerheit diesen Vorgang fördert. In beiden Fällen ist es die Schaffung einer Schutzdecke, die die darunterliegende Bodenschicht vor Austrocknung und Belichtung schützt und sie locker erhält. Die Art der Bedeckung ist an sich gleichgültig, bei der Bearbeitungsgare ist es die vornehmlich durch Eggarbeit erzeugte Krümeldecke, bei der Beschattungsgare ist es der Pflanzenbestand, es kann auch eine Bedeckung mit Papier die gleiche Wirkung haben, sofern nur der Luftzutritt nicht behindert ist.

Endlich ist zu betonen, daß auch eine gewisse Zeit erforderlich ist, damit der Vorgang der Selbstauflockerung seine Wirkung entfalten kann. Wir dürfen daher die technischen Maßnahmen, die der Erreichung des Garezustandes dienen sollen, nicht in planloser Häufigkeit ausführen, weil wir dann den Vorgang der Selbstauflockerung nur stören, unter Umständen auch vorzeitig beenden würden. Zur Garebildung gehört eine gewisse Ruhezeit des Bodens.

Da die Entstehung der Bodengare vorwiegend ein biologischer Vorgang ist, können wir den Endzweck aller Bodenbearbeitungsmaßnahmen ebenfalls in dem Bestreben erblicken, die biologischen Prozesse im Boden zu unterstützen. Diese Gleichsetzung der Aufgaben ist um so mehr angängig, als das biologische Gedeihen des Bodens günstige physikalische und chemische Eigenschaften voraussetzt. Auf der anderen Seite begünstigt eine zweckmäßige und richtig ausgeführte Bodenbearbeitung stets in gleicher Weise biologische, wie chemisch-physikalische Eigenschaften des Bodens.

Die Wirkungen der Bodenbearbeitung kann man dabei in zwei Richtungen erblicken, von denen die eine in der Regulierung der Bodenfeuchtigkeit, die andere vornehmlich in der Durchlüftung des Bodens besteht. Diese beiden Wirkungen der Bodenbearbeitung stehen in fester Beziehung zueinander und beeinflussen sich gegenseitig.

Der Durchlüftung dienen im allgemeinen alle lockernden Maßnahmen, die in ihrer Wirkung vom Pflug bis zur Egge abgestuft sind. Die Auflockerung des Bodens ist aus mancherlei Gründen notwendig. Die chemischen und biologischen Prozesse im Boden bedürfen der ständigen Zufuhr von Sauerstoff. Oxydations-

und Atmungsvorgänge sind für die Vorgänge im Boden bestimmend. Daneben muß die sich im Boden durch Zersetzung der organischen Substanz, durch Atmung der Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln ständig bildende Kohlensäure aus dem Boden entfernt werden. Durchlüftung des Bodens bedeutet also nicht nur Zuführung von frischer Luft, sondern Gasaustausch, der um so wichtiger wird, je weiter die Vegetation fortschreitet, und der es notwendig macht, nicht nur eine Bearbeitung des Bodens als Vorbereitung zur Saat vorzunehmen, sondern auch während der Vegetation durch zweckmäßige Pflegemaßnahmen diesen Boden weiterhin offen zu halten.

Die Durchlüftung des Bodens wird herabgesetzt durch die allmähliche Dichtlagerung eines Bodens, der längere Zeit nicht bearbeitet ist. Die regelmäßige Bearbeitung, die wir vornehmen, sorgt für geeignete Auflockerung. Daneben gibt es Böden, die die unangenehme Eigenschaft zeigen, kurze Zeit nach der Bearbeitung bereits an ihrer Oberfläche wieder zu verhärten, wodurch ein Luftabschluß gebildet wird. Es ist vorwiegend Aufgabe der Bodenpflege, dieser sogenannten Verkrustung entgegenzuwirken und durch häufige flache Bearbeitung die Offenhaltung des Bodens zu ermöglichen. Die Neigung zur Verkrustung ist ein Zeichen dafür, daß solchen Böden die strukturgebenden Bestandteile fehlen, die wir eingangs als notwendig zur Aufrechterhaltung der Krümelstruktur kennen gelernt haben. Wir können nun zwar durch mechanische Bearbeitung eine Zerkleinerung der Kruste erreichen, wir können aber durch mechanische Mittel allein keine Krümelstruktur erreichen, wenn dem Boden die strukturbildenden Bestandteile fehlen. Auch läßt sich der Zustand der mechanischen Zerkleinerung nur für kurze Zeit aufrecht erhalten. In solchem Falle ist die Bodenbearbeitung nur durch Anreicherung des Bodens mit den ihm fehlenden Bestandteilen wirksam zu gestalten.

Die Durchlüftung des Bodens darf nicht rücksichtslos vorgenommen werden, weil alle Maßnahmen der Bodenlockerung gleichzeitig einen Feuchtigkeitsverlust bedeuten. Wenn wir den Boden pflügen, grubbern oder auch nur eggen, so setzen wir damit stets neue Bodenteile der Verdunstung aus. Diese Verdunstung ist um so stärker, je gröber lockernd der betreffende Vorgang sich auswirkt. Damit steht im Zusammenhang, daß wir uns der Eggarbeit bedienen können, um die Verdunstung bei Grubberarbeit und Pflugarbeit herabzusetzen. Die unmittelbare Aufeinanderfolge der Eggarbeit auf gröber lockernde Arbeiten ist eines der wertvollsten Mittel, die mit der Bearbeitung des Bodens verbundene Wasserverdunstung auf das geringst mögliche Maß herabzudrücken. Die Egge überzieht den gröber gelockerten Boden mit einer Schutzdecke, die aus feineren Bodenkrümeln besteht und die nun die Verdunstung weitgehend herabsetzt.

Von dieser gleichen Schutzwirkung der Eggarbeit machen wir Gebrauch, wenn wir die Egge nach der Walze folgen lassen. Auch die Walzarbeit als bodenverdichtender Vorgang bringt einen Feuchtigkeitsverlust mit sich, da durch das Andrücken des Bodens die Kapillarität erhöht wird, Wasser aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche steigt und dort verdunstet. Ein unmittelbar der Walzarbeit folgender Eggstrich schafft auch hier die Schutzdecke, die eine allzu starke Verdunstung verhindern kann.

Die Aufeinanderfolge der gegen Verdunstung schützenden Eggarbeit auf die übrigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen ist selbstverständlich in den verschiedenen Jahreszeiten von verschieden großer Bedeutung. Wenn ein Boden vor Winter gepflügt wird und den Winter über liegen bleiben soll, so spielt es keine große Rolle, ob wir die mit dem Pflügen verbundene Verdunstung herabmindern oder nicht, da der Überschuß der Winterfeuchtigkeit ja alles ersetzen wird. Beim Pflügen im Frühjahr wie überhaupt beim Pflügen kurz vor der Saat ist es jedoch von außerordentlich großer Bedeutung, die Feuchtigkeitsmenge, die im Boden ist, für die Pflanzen zu erhalten. In unserem Klima ist es besonders wichtig, den Überschuß an Feuchtigkeit, der sich während des Winters ansammeln konnte und den wir mit Winterfeuchtigkeit bezeichnen, für die Vegetation der Pflanzen zu erhalten.

Die Erhaltung der Bodenfeuchtigkeit bildet den wichtigsten Teil der Maßnahmen, die der Regulierung der Feuchtigkeit dienen. Die vielfachen Pflegearbeiten, Eggen und Hacken, gewinnen unter diesem Gesichtspunkt eine besonders große Bedeutung. Die enge Wechselbeziehung, die zwischen Durchlüftung und Feuchtigkeitsregulierung besteht, bringt es mit sich, daß beide Wirkungen stets im Auge behalten werden müssen.

Mit Luftzuführung und Regulierung der Feuchtigkeit ist gleichzeitig eine Förderung der Erwärmung des Bodens verbunden. Die Bodenwärme wird von dem Luft- und Wassergehalt des Bodens sowie von Luft- und Wasserbewegung im Boden beeinflußt, wir sind daher durch unsere Maßnahmen der Bodenbearbeitung in der Lage, in gleicher Weise wie auf die Durchlüftung und Feuchtigkeitsregulierung auch auf die Erwärmung des Bodens einen Einfluß auszuüben. Da für den Ablauf der biologischen Vorgänge eine gewisse Bodentemperatur erforderlich ist, so können wir gleichzeitig feststellen, daß der Einfluß unserer Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf die Garebildung in der wärmeren Jahreszeit am stärksten ist.

Wir haben damit das Ziel der Bodenbearbeitung gekennzeichnet und den Bodenzustand beschrieben, der durch die Bodenbearbeitungsmaßnahmen erreicht werden soll. Es leuchtet ein, daß diejenigen Böden, die auf Grund ihrer Entstehungsbedingungen sowie ihrer seitherigen Behandlung alle Stoffe enthalten, die zur Bildung einer natürlichen Krümelstruktur gehören, sich schneller in den Zustand der Bodengare überführen lassen und diesen auch länger bewahren als Böden, denen die zur Erreichung dieses Zustandes wesentlichen Stoffe ganz oder teilweise fehlen. Wo wir mit den Maßnahmen der Bodenbearbeitung keinen rechten Erfolg haben, wo wir das gesteckte Ziel, die Garebildung, nur schwer oder unvollkommen erreichen, müssen wir daher folgerichtig zunächst diejenigen Stoffe zuführen, die diesem Boden zur Garebildung fehlen. Im allgemeinen wird es die Verarmung an Kolloiden und an Kalk sein, die die Garebildung hindert. Auf solchen Böden müssen wir daher durch Kalk- und Stallmistzufuhr zunächst die Grundlage für die Garebildung schaffen.

Bodenbearbeitung und Pflanzenernährung weisen bei näherer Betrachtung mannigfache Beziehungen zueinander auf, die um so mehr an Bedeutung gewinnen, je tiefer wir in die Fragen der Bodenkultur eindringen und je mehr wir unter

Pflanzenernährung nicht nur die Zufuhr bestimmter Stoffe, sondern auch deren Zubereitung bzw. Überführung in Formen, die von den Pflanzen ausgenutzt werden können, verstehen. Die Bearbeitung des Bodens hat die bestimmte Aufgabe, den Boden für das Pflanzenwachstum herzurichten, die Bedingungen zu schaffen, die für den ungestörten Ablauf aller mit der Pflanzenernährung und dem Pflanzenwachstum zusammenhängenden Vorgänge erforderlich sind. Ein großer Teil der Wirkung aller Bodenbearbeitungsmaßnahmen besteht darin, daß einerseits der natürliche Vorrat an Pflanzennährstoffen erschlossen wird, anderseits die durch Düngung zugeführten Stoffe diejenigen Umsetzungen erfahren, die sie für die Pflanze aufnehmbar machen. Umgekehrt bedürfen, wie wir gesehen haben, auch die Bodenbearbeitungsmaßnahmen bestimmter Voraussetzungen in Form geeigneter Düngungsmaßnahmen, wenn sie ihre Wirkung voll entfalten sollen

Das Reduktionsgleichgewicht des Bleisulfids und die chemischen Konstanten von Schwefel und Schwefelwasserstoff

Von Prof. Dr. Karl Jellinek und Dipl.-Ing. August Deubel

Zwecks Ermittlung der chemischen Konstanten von Schwefel und Schwefelwasserstoff wurde das Reduktionsgleichgewicht:

$$PbS + H_2 \rightleftarrows Pb + H_2S$$

nach der Strömungsmethode untersucht. Bei 515° C war dieses Gleichgewicht bereits von K. Jellinek und J. Zakowski[1]) ermittelt worden. Die Untersuchung wurde nun mit verbesserten Mitteln bis auf 1000° C ausgedehnt.

1. Das Reduktionsgleichgewicht $PbS + H_2 \rightleftarrows Pb + H_2S$.

Über zwei je 6 cm lange Porzellanschiffchen, die mit 13 g PbS gefüllt waren und in einem Porzellanrohr lagen, wurde H_2 geleitet. Das Porzellanrohr wurde in einem elektrischen Ofen geheizt und die Temperatur mittels eines Pt, PtRh-Thermoelementes, das im Innern des Reaktionsrohres sich befand, gemessen. Längs der Schiffchen variierte die Temperatur keinesfalls mehr als um $\pm 3°$ um die Mitteltemperatur. Der Wasserstoff, aus $Zn + H_2SO_4$, war durch alkalische $KMnO_4$ lsg. gereinigt, von O_2 durch glühenden Pt-asbest befreit und mit $CaCl_2$ getrocknet. Das PbS war durch Fällung von analysenreinem Bleiazetat in verdünnt salpetersaurer Lösung mit H_2S hergestellt und im CO_2strom auf Rotglut zur Entfernung von H_2O und überschüssigem Schwefel erhitzt. Das PbS war nach Analyse 99,8prozentig. Es sah nach der Herstellung blauschwarz aus und verwandelte sich durch Erhitzen auf Reaktionstemperatur in glänzende schöne Kriställchen. Das Blei wurde erst durch die Reaktion im Ofen erzeugt und war in merklichen Mengen vorhanden. Es waren bei allen Reaktionstemperaturen zwei kondensierte Phasen vorhanden: 1. Geschmolzenes Blei (Schmelzpunkt 327° C), das mit PbS gesättigt ist und nach dem Befund von K. Friedrich und A. Leroux[2]) bis 800° C nur etwa 4 Mol % PbS, bis 900° C nur etwa 9 Mol % PbS, bis 1000° C dagegen schon bis etwa 50 Mol % PbS auflöst, und 2. kristallisiertes reines PbS, dessen Schmelzpunkt erst bei 1112° C liegt. Das Verhältnis von H_2 und H_2S in dem abziehenden Gasgemisch wurde durch Absorption des H_2S in NaOH und Auffangen des H_2 über Wasser festgestellt. Der gebildete H_2S wurde durch Einfließenlassen in salzsaure Jodlösung und Titration des überschüssigen Jods mit $^1/_{10}$ n · $Na_2S_2O_3$-Lösung bestimmt.

Der Dampfdruck des Pb beträgt bei 1000° C erst etwa 2 mm Hg, der des PbS bereits[3]) 17 mm Hg. Für die Bestimmung des Verhältnisses $\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}}$ bedingt dies jedoch keinerlei Fehler; denn das in die kältere Zone des Reaktionsrohres sublimierende PbS vermag mit dem Gemisch aus H_2 und H_2S nicht zu reagieren, da bei tieferen Temperaturen weniger H_2S im Gleichgewichtsgemisch vorhanden ist.

Auch eine numerische Berücksichtigung des Dampfdruckes von PbS erübrigt sich, da das Verhältnis $\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}}$ unabhängig vom absoluten Werte der Einzeldrucke unmittelbar durch die Analyse gegeben ist.

Durch Anwendung eines Gemisches von H_2S,H_2 war von der H_2S-Seite kein Gleichgewicht zu erzielen, da H_2S zu langsam durch PbS hindurchdiffundiert, um nach der Strömungsmethode eine Gleichgewichtseinstellung zu erzielen.

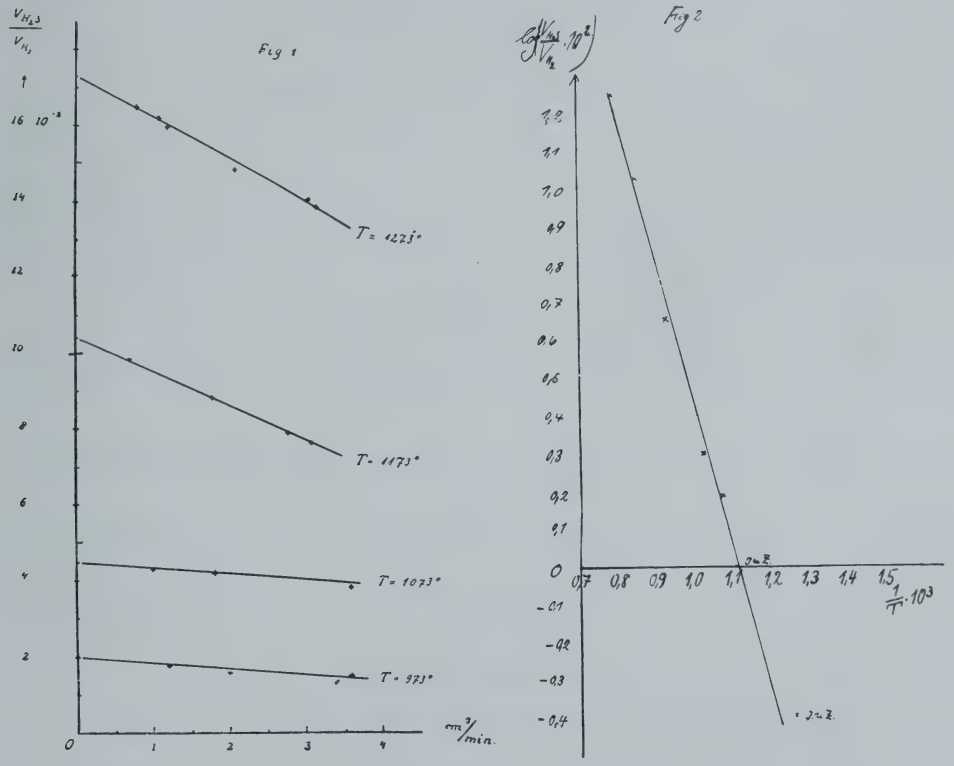
Die Versuchsresultate von der H_2-Seite sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1.

$PbS + H_2 \rightleftarrows Pb + H_2S$.

Absolute Temperatur	Versuchs-dauer in min	Strömungs-geschwindigk. $\frac{cm^3}{min}$	Vol H_2 0°,760 mm	verbr. ccm n/10 J_2	$\frac{V_{H_2S}}{V_{H_2}} = \frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}}$
T = 1273°					
	32	3,2	88,8	11,04	$14{,}0.10^{-2}$
	33,5	3,1	89,5	11,30	$14{,}2.10^{-2}$
	49	2,1	89,8	11,98	$14{,}9.10^{-2}$
	83	1,2	87,8	12,52	$16{,}0.10^{-2}$
	90	1,1	88,7	12,89	$16{,}2.10^{-2}$
	112	0,8	89,9	13,25	$16{,}5.10^{-2}$
		0			$17{,}3.10^{-2}$
T = 1173°					
	47	3,1	133,5	9,14	$7{,}6.10^{-2}$
	51	2,8	133,6	9,48	$7{,}9.10^{-2}$
	79	1,8	133,4	10,51	$8{,}8.10^{-2}$
	211	0,7	137,4	11,95	$9{,}8\ 10^{-2}$
		0			$10{,}4.10^{-2}$
T = 1073°					
	65	3,6	226,4	7,58	$3{,}8.10^{-2}$
	128	1,8	226,1	8,17	$4{,}1.10^{-2}$
	245	1,0	227,7	8,81	$4{,}3.10^{-2}$
		0			$4{,}5.10^{-2}$
T = 973°					
	125	3,6	453,1	6,10	$1{,}5.10^{-2}$
	229	2,0	451,3	6,45	$1{,}6.10^{-2}$
	400	1,2	454,4	7,19	$1{,}8.10^{-2}$
		0			$2{,}0.10^{-2}$
T = 928°					
	127	3,7	451,7	6,64	$1{,}65.10^{-2}$
	140	3,4	451,7	6,44	$1{,}60.10^{-2}$
	222	2,1	450,1	6,39	$1{,}59.10^{-2}$
	230	1,0	226,1	3,02	$1{,}50.10^{-2}$
		0			$1{,}55.10^{-2}$

In Tabelle 1 sind als Strömungsgeschwindigkeiten angegeben die Quotienten der Summe der auf Normalbedingungen reduzierten Gasvolumina H_2+H_2S durch die Versuchsdauer in Minuten. Die graphische Extrapolation auf die Strömungsgeschwindigkeit Null ist aus Fig. 1 für die vier höchsten Temperaturen ersichtlich. In Fig. 2 sind noch die Werte von $\log\left(\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}} \cdot 10^2\right)$ in Abhängigkeit von



$\frac{1}{T}$ aufgetragen und auch die zwei Daten von Jellinek und Zakowski verzeichnet. Man sieht, daß alle Daten, mit Ausnahme des bei der tiefsten Temperatur gemessenen, ungenauesten Versuches in eine gerade Linie fallen.

2. Ermittlung der S_2-tension über Pb, PbS.

Zur Ermittlung der S_2-tension über Pb, PbS muß man nun das sehr gut von G. Preuner und W. Schupp [4]), sowie von M. Randall und F. R. von Bichowsky [5]) ermittelte Gleichgewicht der H_2S-Dissoziation: $2H_2+S_2 \rightleftarrows 2H_2S$ heranziehen. Dieses Gleichgewicht läßt sich nach G. N. Lewis und M. Randall [6]) folgendermaßen darstellen. In die Gleichung der differenzierten Reaktionsisochore:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{d \ln \left(\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2} \cdot p_{S_2}^{1/2}} \right)}{dT} = \frac{-Q_p}{RT^2}$$

kann man unter Anwendung der von Lewis gegebenen Molekularwärmen:

$C_{p_{H_2}} = 6{,}50 + 0{,}0009\,T$; $C_{p_{S_2}} = C_{p_{O_2}} = 6{,}5 + 0{,}0010\,T$; $C_{p_{H_2S}} = C_{p_{H_2O}} = 8{,}81 - 0{,}0019\,T + 0{,}00000222\,T^2$

für Q_p setzen:

$$Q_p = Q_o + 0{,}94\,T + 0{,}0057\,T^2 - 0{,}00000074\,T^3.$$

Hierbei ist mangels bekannter Daten die Größe $C_{p_{S_2}}$ gleich der des nächstverwandten Gases $C_{p_{O_2}}$ gesetzt, und ebenso $C_{p_{H_2S}} = C_{p_{H_2O}}$. Diese Annahme bewährt sich sehr gut. Durch Anpassung an die Versuchsdaten, die von $T = 1023$ bis $T = 1667$ reichen, erhält man die ausgezeichnet stimmende Gleichung:

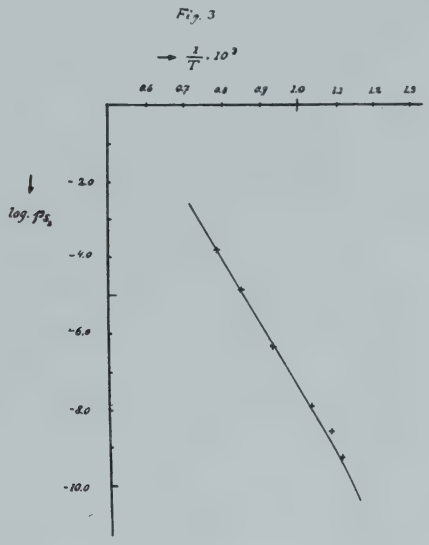
$$\log K_p = \log \left(\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2} \cdot p_{S_2}^{1/2}} \right) = \frac{19200}{4{,}571\,T} - \frac{0{,}94}{1{,}985} \log T - \frac{0{,}00165}{4{,}571} \cdot T + \frac{0{,}00000037}{4{,}571} T^2 - \frac{1{,}65}{4{,}571} \quad (1).$$

Man braucht jetzt nur von $\log \frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}}$, den wir im Reaktionsgleichgewicht fanden, die Gleichgewichtskonstante K_p der H_2S-Dissoziation für dasselbe T zu subtrahieren, um $\frac{1}{2} \log p_{S_2}$ zu erhalten.

Tabelle 2.

S_2-Tensionen von PbS.

T	$\log \frac{p_{H_2S}}{p_{H_2}}$ gefd.	$\log K_p = \log \left(\frac{p_{H_2S}}{p_{H_2} \cdot p_{S_2}^{1/2}} \right)$	$\log p_{S_2}$ Atm.
903	− 2,00	+ 2,62	− 9,24
928	− 1,81	+ 2,49	− 8,60
973	− 1,70	+ 2,26	− 7,92
1073	− 1,35	+ 1,82	− 6.34
1173	− 0,98	+ 1,45	− 4,86
1273	− 0,76	+ 1,13	− 3,78



In Fig. 3 sind $\frac{1}{T} \cdot 10^3$ und log p_{S_2} aufgetragen. Man erhält wieder eine gerade Linie.

3. Ermittlung der chemischen Konstanten von S_2 aus dem Gleichgewicht $2\,Pb + S_2 \rightleftarrows 2\,PbS$.

Zuerst wurde die Wärmetönung Q_p für die Dissoziation des PbS ermittelt. Gleichgültig, ob das Pb wenig oder viel PbS gelöst enthält, gilt für die Gleichgewichte der gesättigten Bleiphase für relativ kleine Temperaturintervalle die integrierte Reaktionsisochore mit konstantem Q_p:

$$\log p_{S_{2,1}} - \log p_{S_{2,2}} = - \frac{Q_p}{4{,}571} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right). \tag{2}$$

Hieraus berechnet sich mit $T_1 = 1173$, $T_2 = 973$, $\log p_{S_{2,1}} = -4\,86$, $\log p_{S_{2,2}} = -7{,}92$ der Wert $Q_D = 79930$ cal für $T = 1073$. Diese Wärmetönung können wir bei bekannten Molwärmen der Reaktionsteilnehmer auf $T = 0$ reduzieren. Hierbei setzen wir jetzt wie bei 0_2 als Molwärme für S_2 den Ausdruck [7]):

$$C_{p_{S_2}} = \frac{7}{2} R + \varphi \left(\frac{3600}{T}\right),$$

wo φ eine Planck-Einsteinsche Funktion mit 2 Freiheitsgraden und einem Wert von $\Theta = 3600$ bedeutet. Es wird dann:

$$79930 = Q_0 + 3{,}5\,RT + E_{S_2} + 2\int_0^T C_{Pb} \cdot dT - 2\int_0^T C_{PbS} \cdot dT, \tag{3}$$

wo E_{S_2} die Schwingungsenergie der S-Atome in S_2 ist [8]). Das Integral für Pb besteht aus folgenden Gliedern:

$$2\int_{0}^{T} C_{Pb} \cdot dT = 2\int_{0}^{600} C_{Pb_f} \cdot dT + 2\varrho_{Pb} \cdot dT + 2\int_{600}^{T} C_{Pb_{fl}} \cdot dT,$$

Das Glied für das feste Pb ist nach den Tabellen von Miething [9]) 7344 cal, für die Schmelzwärme des Pb wurde nach Landolt-Börnstein [10]) 1200 cal pro Grammatom genommen, endlich ist die Molwärme von reinem flüssigen Pb konstant zu 7,04 cal nach Jitaka [11]) gesetzt [12]).

Die Molwärme des PbS ist von E. D. Eastman und W. H. Rodebush [13]) von $T = 63{,}8$ bis $T = 282{,}7$ gemessen worden, während für höhere Temperaturen Bornemann und Hengstberg [14]) die mittleren Molekularwärmen zwischen 0 und 100° C zu 11,96 cal, zwischen 0—300° C zu 12,35 cal und zwischen 0—600° C zu 12,92 cal fanden. Es wurde nun die Debyesche Größe Θ für PbS aus den tiefsten Messungen mit Hilfe der für eine Debyesche Funktion berechneten Tabellen ermittelt, wobei keine Korrektur für C_v angebracht wurde.

Tabelle 3.

Θ für PbS.

T	$\frac{C_p}{2}$ beob.	$\frac{\Theta}{T}$	Θ
63,8	3,86	3,10	198,8
66,6	3,98	2,97	197,18
70,0	4,05	2,90	203
73,1	4,17	2,78	203,2
75,9	4,20	2,75	209
78,8	4,32	2,63	207
81.7	4,40	2,55	208
84.6	4,44	2,51	212
87,4	4,54	2,40	210
90,1	4,56	2,38	214
100,0	4,80	2,13	213

Mittels der Größe $\Theta = 200$ wurde nun die Cp-Kurve für PbS nach unten ergänzt, während nach oben aus den Daten von Bornemann sich ergibt:

$$C_{p,m} = 11{,}78 + 0{,}00185\ t$$

oder nach $C_w = (t - t_0)\frac{d\ C_{m\ t_0 t}}{dt} + C_{m\ t_0}$

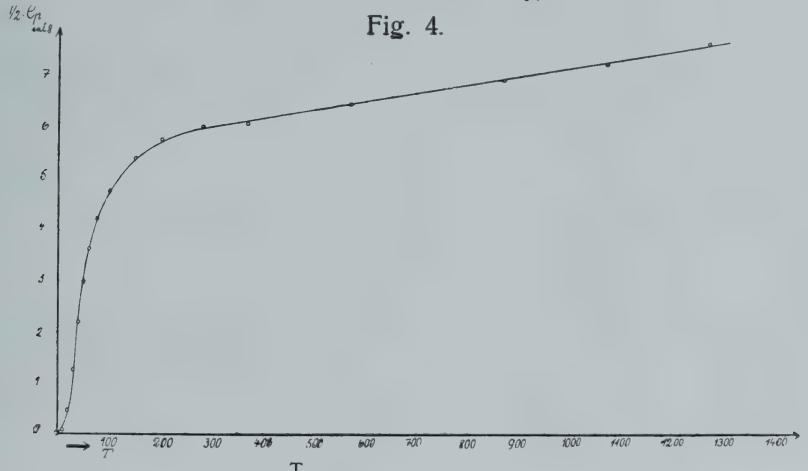
sich die in Tabelle 4 verzeichneten Werte von $C_{p,w}$ ergeben.

Tabelle 4.

T	$C_{p,w}$
373	12,15
573	12,91
873	14,03
1073	14,74
1273	15,48

In Fig. 4 ist jetzt der Temperaturverlauf von $C_{p,w}$ ersichtlich.

Fig. 4.



Aus Fig. 4 wurde nun $\frac{1}{2}\int_0^T C_{p,PbS} \cdot dT$ graphisch ermittelt und die Werte in Tabelle 5 eingetragen.

Tabelle 5.
Wärmegehalt für ½ PbS

T	$\frac{1}{2}\int_0^T C_w \cdot dT$ cal.
100	258
200	762
273	1141
300	1347
400	1952
500	2577
600	3220
700	3880
800	4560
903	5221
928	5398
973	5720
1073	6450
1173	7265
1273	8030

Aus Gl. 3 wird jetzt:

$$79930 = Q_0 + 7456 + 270 + 7344 + 2400 + 6660 - 25800$$

und daher $Q_0 = 81600$ cal[15]) für 2 Mol PbS.

Die Bildungswärme für PbS, das aus $Pb(NO_3)_2$ lsg. mit Na_2S gefällt war, ist für Zimmertemperatur von Thomsen und von Berthelot beobachtet worden. Sie fanden[16]) 20900 cal, bzw. 20300 cal. Hierbei ist der Ausgangszustand festes Blei und rhombischer Schwefel. Nun fand aber F. Pollitzer[17]) aus der Bildungswärme des H_2S aus den gasförmigen Elementen (Dissoziations-Gleichgewicht) und aus der von ihm selbst ermittelten Bildungswärme von H_2S aus rhombischem Schwefel (Gleichgewicht $S_{rh} + 2\,HJ = H_2S + J_2$f) die Wärmetönung für den Übergang $2\,S_{rh} \longrightarrow S_2$. Pollitzer setzt:

$$\begin{array}{rl} 2\,H_2 + S_2 \rightleftarrows & 2\,H_2S + 39400 \text{ cal} \\ 2\,H_2S \rightleftarrows & 2\,H_2 + 2\,S_{rh} - 10000 \text{ cal} \\ \hline S_2 \rightleftarrows & 2\,S_{rh} + 29400 \text{ cal.} \end{array}$$

Lewis und Randall finden 29700 cal. Nehmen wir rund 29500 cal, so wird weiter:

$$\begin{array}{rl} 2\,Pb + 2\,S_{rh} = & 2\,PbS + 41200 \text{ cal (Mittel Berthelot-Thomsen)} \\ S_2 = & 2\,S_{rh} + 29500 \text{ cal} \\ \hline 2\,Pb + S_2 = & 2\,PbS + 70700 \text{ cal.} \end{array}$$

Reduziert man dies noch auf $T = 0$ mittels der Gleichung:

$$Q_p = Q_0 + \frac{7}{2} RT + E_{S_2} + 2\int_0^{290} C_{Pb} - 2\int_0^{290} C_{PbS} \cdot dT \text{ bezw.}$$

$$70700 = Q_0 + 2015 + 0 + 3186 - 5000,$$

so wird endlich $Q_0 = 70500$ cal.

Der Unterschied zwischen der von uns gefundenen Wärmetönung von 81600 und 70500 cal, d. h. etwa 12000 cal pro 2 Mol PbS wird dadurch zu erklären sein, daß wir mit schön kristallisiertem PbS arbeiteten, dagegen Berthelot-Thomsen gefälltes amorphes verwendeten. Es beträgt z. B. die Umwandlungswärme[18]) von gefälltem PbSe in kristallisiertes pro 2 Mol + 7400 cal, bei 2 ZnSe sogar 14600 cal, bei CdSe + 9800 cal und ähnlich bei anderen Metallseleniden; bei Sb_2S_3 ist die Umwandlungswärme von gefälltem in schwarzes 5600 cal. Wir müssen natürlich mit dem von uns gefundenen Wert Q_0 weiter rechnen. Wir nehmen also an, daß die Umwandlungswärme von gefälltem PbS in kristallisiertes bei Zimmertemperatur pro 1 Mol 5500 cal beträgt.

Für die Schwefeltension (in Atm.) des PbS gilt[19]) oberhalb des Schmelzpunktes von Pb, aber bei festem PbS:

$$\log p_{S_2} = \overset{I}{\frac{-Q_o}{4{,}571\,T}} + \overset{II}{3{,}5 \log T} + \frac{1}{4{,}571} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \overset{III}{\frac{Es_2}{T^2}}\, dT + \frac{2}{4{,}571} \Bigg[\overset{600}{\underset{0}{\int}} \frac{dT}{T^2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \overset{IV}{C_{Pbf}} \cdot dT + \overset{T}{\underset{600}{\int}} \frac{dT}{T^2} \Bigg(\overset{600}{\underset{0}{\int}} \overset{V}{C_{Pbf}} \cdot dT + \overset{VI}{\varrho_{Pb}} + \overset{T}{\underset{600}{\int}} \overset{VII}{C_{Pb,fl}} \cdot dT \Bigg) \Bigg] - \frac{2}{4{,}571} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \frac{dT}{T^2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \overset{VIII}{C_{PbSf}} \cdot dT + \overset{IX}{C_{S_2}}. \tag{4}$$

In dieser Gleichung ist für Q_o zu setzen 81600, das Glied III ist den Tabellen von Landolt-Börnstein zu entnehmen. [Planck-Einstein-Funktion $\varphi\left(\frac{3600}{T}\right)$], IV ist nach Miethings Tabellen + 6,17, Glied V wird $\frac{2 \cdot 3672}{4{,}571}\left(\frac{1}{600} - \frac{1}{T}\right)$, Glied VI $\frac{2 \cdot 1200}{4{,}571}\left(\frac{1}{600} - \frac{1}{T}\right)$, Glied VII mit $C_{Pbfl} = 7{,}04$ wird $\frac{14{,}08}{1{,}985} \log \frac{T}{600} + \frac{14{,}08}{4{,}571} \cdot \left(\frac{600}{T} - 1\right)$. Glied VIII für C_{PbS} wurde graphisch ermittelt. Bis $T = 100$ wurde dieses Glied nach einer Debyefunktion mit $\Theta = 200$ berechnet; oberhalb $T = 100$ wurde $\frac{1}{2T^2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} C_p \cdot dT$ nach Tabelle 5 berechnet, aufgetragen und durch graphische Integration $\frac{1}{2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \frac{dT}{T^2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} C_p \cdot dT$ ermittelt. Die ermittelten Daten, die höchstens um 0,1 unsicher sind, stehen in Tabelle 6.

Tabelle 6.

T	$\frac{1}{2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} \frac{dT}{T^2} \overset{T}{\underset{0}{\int}} C_{PbS} \cdot dT$
100	1,74
200	3,96
300	5,61
400	6,95
500	8,07
600	9,03
700	9,88
800	10,63
900	11,30
1000	11,92
1100	12,50
1200	13,04
1300	13,55

Die Resultate der Berechnungen nach Gl. 4 sind nun in Tabelle 7 niedergelegt.

Tabelle 7.

$2\,Pb + S_2 \rightleftarrows 2\,PbS.$

T	log p_{S_2} Atm	Glied I $-\frac{Q_0}{4{,}571\,T}$	Glied II $3{,}5 \log T$	Glied III $\frac{1}{4{,}571} \cdot \int_0^T \frac{E_{S_2}}{T^2}\,dT$	Glied IV $\frac{2}{4{,}571} \int_0^{600} \frac{dT}{T^2} \int_0^T C_{Pbf} \cdot dT$
903	— 9,24	— 19,77	+ 10,35	+ 0,007	+ 6,17
928	— 8,60	— 19,24	+ 10,39	+ 0,01	+ 6,17
973	7,92	— 18,35	+ 10,46	+ 0,01	+ 6,17
1073	— 6,34	— 16,63	+ 10,60	+ 0,015	+ 6,17
1173	— 4,86	— 15,22	+ 10,74	+ 0,02	+ 6,17
1273	— 3,78	— 14,03	+ 10,86	+ 0,03	+ 6,17

T	Glied V $\frac{2}{4{,}571} \int_{600}^{T} \frac{dT}{T^2} \int_0^{600} C_{Pbf} \cdot dT$	Glied VI $\frac{2}{4{,}571} \int_{600}^{T} \frac{dT}{T^2} \varrho_{Pb}$	Glied VII $\frac{2}{4{,}571} \int_{600}^{T} \frac{dT}{T^2} \int_{600}^{T} C_{Pbfl} \cdot dT$	Glied VIII $\frac{2}{4{,}571} \int_0^{T} \frac{dT}{T^2} \int_0^{T} C_{PbSf} \cdot dT$	Glied IX C_{S_2}
903	+ 0,90	+ 0,29	+ 0,23	— 9,91	+ 2,49
928	+ 0,95	+ 0,31	+ 0,26	— 10,04	+ 2,59
973	+ 1,03	+ 0,34	+ 0,31	— 10,29	+ 2,40
1073	+ 1,19	+ 0,39	+ 0,43	— 10,81	+ 2,30
1173	+ 1,32	+ 0,43	+ 0,56	— 11,29	+ 2,41
1273	+ 1,41	+ 0,46	+ 0,69	— 11,73	+ 2,36
				Mittel	+ 2,43

Die chemische Konstante des S_2 ergibt sich also zu $C_{S_2} = +2{,}43$. Um ein Urteil über die Genauigkeit von C_{S_2} zu gewinnen, wollen wir bedenken, daß die Unsicherheit in $\log p_{S_2}$ höchstens $\pm 0{,}1$ ist, daß weiter wegen Unsicherheit von Q_0 um etwa 500 cal auch in Glied I eine Unsicherheit von etwa $\pm 0{,}1$ besteht, Glied II enthält keine Unsicherheit, Glied III spielt keine Rolle, Glied IV ist sicher, ebenso Glied V und VI. Die Unsicherheit in Glied VII wegen Ansteigens der Molekularwärme von Pb und wegen Löslichkeit von PbS in Pb ist, wie eine Rechnung lehrt, auch nicht größer als $\pm 0{,}1$ und dasselbe gilt für Glied VIII. Da sich die vier Fehler von je 0,1 nicht addieren werden, wird man den Fehler von C_{S_2} auf höchstens $\pm 0{,}3$ schätzen.

Ebenso wie in der Halogenreihe die chemische Konstante ansteigt [20]) ($F = 0{,}7$; $Cl = 1{,}73$; $Br_2 = 2{,}54$; $J_2 = 3{,}44$), steigt auch in der Sauerstoffreihe die chemische Konstante an ($O_2 = 0{,}54$, $S_2 = 2{,}43$). Ein Vergleich mit der Integrationskonstante der Dampfspannungsgleichung für festen kristallisierten Schwefel zu S_2 ist nicht möglich. Das Trägheitsmoment J des S_2-Moleküls ergibt sich nach der Formel der statistischen Mechanik [21])

$$C = -1{,}59 + 38{,}40 + 1{,}5 \log M + \log J$$

zu $\log J_{S_2} = -37{,}09$ g cm², während $\log J_{O_2} = -39{,}02$ ist.

4. Ermittlung der chemischen Konstanten von H_2S.

Für die Reaktion: $2H_2 + S_2 \rightleftarrows 2H_2S$ ist Q_p bei $T = 298$ gleich 39220 cal. Setzt man für die Molekularwärmen rationelle Formeln, und zwar $C_{p_{S_2}} = C_{p_{O_2}}$, $C_{p_{H_2S}} = C_{p_{H_2O}}$ und nimmt man für $C_{p_{H_2}}$, $C_{p_{O_2}}$ $C_{p_{H_2O}}$ die von Eucken [22]) verwendeten Formeln $C_{p_{H_2}} = 6{,}96 + \varphi\left(\frac{5000}{T}\right)$; $C_{p_{S_2}} = 6{,}96 + \varphi\left(\frac{3600}{T}\right)$; $C_{p_{H_2S}} = 7{,}95 + \varphi\left(\frac{2260}{T}\right) + 2\varphi\left(\frac{5000}{T}\right)$, so wird $Q_{p_0} = 39220 - \frac{5}{2} RT = 37740$ cal.

Die Reaktionsisochore wird dann:

$$\log K_p = \log\left(\frac{p_{H_2^2S}}{p_{H_2}^2 \cdot p_{S_2}}\right) = +\frac{37740}{4{,}571\,T} - 2{,}5 \log T - \frac{1}{4{,}571}\int_0^T \frac{dT}{T^2}\int_0^T \left[2\varphi\left(\frac{5000}{T}\right) + \varphi\left(\frac{3600}{T}\right) - 2\varphi\left(\frac{2260}{T}\right) - 4\varphi\left(\frac{5000}{T}\right)\right] dT + \text{Const.} \quad (5)$$

Tabelle 8.

$$2\ H_2 + S_2 \rightleftarrows 2\ H_2S.$$

T	log K_p	$+\frac{37740}{4571\,T}$	$-2{,}5 \log T$	$-\frac{1}{4{,}571} \cdot \psi$	Const.
1023	4,050	8,072	— 7,525	+ 0,09	+ 3,42
1103	3,420	7,487	— 7,607	+ 0,11	+ 3,43
1218	2,610	6,779	— 7,716	+ 0,14	+ 3,41
1338	1,928	6,170	— 7,811	+ 0,17	+ 3,40
				Mittel	+ 3,42

Die Übereinstimmung dieser rationellen[23]) Gleichung mit der Erfahrung zeigt Tabelle 8. Nach dem Nernst-Theorem folgt nun:

$$\text{Const} = -\Sigma \nu C = -2\,C_{H_2} - C_{S_2} + 2\,C_{H_2S} = 3{,}42.$$

Wegen $C_{H_2} = -3{,}71$ (Translation und Rotation)[24]), $C_{S_2} = 2{,}43$ wird endlich $C_{H_2S} = -0{,}79$. Dieser Wert dürfte auf $\pm 0{,}2$ genau sein.

Ebenso wie bei den Halogenwasserstoffen die chemische Konstante ansteigt[25]) (HF = — 1,0; HCl = — 0,26, HBr = + 0,53, HJ = + 0,9), steigt auch die chemische Konstante von H_2O gleich = — 1,94 zu C_{H_2S} = — 0,79 an. Die Konstante C_{H_2S} ließe sich durch die Integrationskonstante der Sublimationsgleichung von kristallisiertem H_2S prüfen, doch sind die Daten zur Zeit leider nicht bekannt.

Das durchschnittliche Trägheitsmoment des H_2S-Moleküls ergibt sich nach der Formel der statistischen Mechanik[26])

$$C_{H_2S} = -0{,}587 + 57{,}85 + 1{,}5 \log M + \frac{3}{2} \log \bar{J}$$

zu $\log \bar{J} = -39{,}56$ g cm², während für H_2O-Dampf $\bar{J} = -39{,}7$ g cm² ist.

5. Zusammenfassung.

1. Das Reduktionsgleichgewicht $PbS + H_2 \rightleftarrows Pb + H_2S$ wurde zwischen T = 900 und T = 1300 gemessen.
2. Die Schwefeltensionen über PbS,Pb wurden berechnet.
3. Die Bildungswärme für kristallisiertes PbS aus Pb und S_2 wurde zu $Q_0 =$ 40800 cal ermittelt, ebenso die Umwandlungswärme von gefälltem PbS in kristallisiertes zu 5500 cal.
4. Die chemische Konstante von S_2 wurde zu $2{,}43 \pm 0{,}3$, die von H_2S zu $= -0{,}79 \pm 0{,}2$ gefunden.

Bei der Ausführung der Untersuchung standen uns, wie dankend erwähnt sei, Mittel der Notgemeinschaft deutscher Wissenschaft zur Verfügung.

Danzig, 1. März 1929.

Anmerkungen

1) K. Jellinek und J. Zakowski, Z. f. anorg. Chemie **142** (1925), 26.

2) K. Friedrich und A. Leroux, Metall. **2** (1905), 536.

3) Siehe R. Schenck und A. Albers, Z. f. anorg. Chem. **105** (1919), 164.

4) G. Preuner u. W. Schupp, Z. f. physikal. Chem. **68** (1909), 157.

5) M. Randall u. F. R. v. Bichowsky, J. Am. Chem. Soc. **40** (1918), 368.

6) G. N. Lewis u. M. Randall, Thermodynamik, S. 502, Wien 1927, J. Springer.

7) Siehe A. Eucken in Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, 11. Aufl. Bd. III, 1, S. 647.

8) E_{S_2} ist aus den Landolt-Börnsteinschen Tabellen, Ergänzungsband zu entnehmen.

9) H. Miething, Tabellen zum Wärmeinhalt fester Körper, Abhandlung der deutschen Bunsenges. Nr. 9. Halle 1920. Knapp.

10) Landolt-Börnstein, Phys.-chem. Tabelle, 5. Auflage, S. 1467.

11) Jitaka, Sc. Rep. Tôhoku-Univ. **8** (1919), 99.

12) In die Gleichung für C_{Pbfl} müßte, genau genommen, die Molwärme der an PbS gesättigten Bleilösung eingesetzt werden. Bezeichnen wir die Wärmetönung bei Bildung von PbS aus S_2 und reinem geschmolzenen Pb mit $Q_{p,\,r.}$ die aus S_2 und gesättigter Lösung von PbS in Pb mit $Q_{p,\,u}$, die Zahl der gelösten Mole PbS in 1 Mol Pb mit x, die Lösungswärme mit L, so wird: $Q_{p,\,r} = Q_{p,\,u} - 2\,x\,L$, und wie man durch einen Kreisprozeß nach Kirchhoff leicht sieht: $\frac{d\,Q_{p,\,u}}{dT} = 2\,C_{Pb,\,ges.} + C_{p,\,S_2} - 2\,C_{PbS} - 2\,x\,C_{PbS}$, wo $C_{Pb\,ges.}$ die Molwärme der gesättigten Pb-Lösung ist und bedacht werden muß, daß vor der Reaktion das Blei PbS auflöst und nach der Reaktion das gelöste PbS aus dem Pb sich abscheidet. Nun gilt aber jedenfalls sehr angenähert für die Molwärme der gesättigten Pb-Lösung: $2\,C_{Pb\,ges.} = 2\,C_{Pbfl} + 2\,x\,C'_{PbS} + 2\,\frac{dx}{dT}\,L$, wo die Molwärme des gelösten PbS, d. h. C'_{PbS} nahe gleich der des reinen festen PbS sein würde. Somit wird endlich: $\frac{d\,Q_{p,\,u}}{dT} = 2\,C_{Pbfl} + 2\,x\,C'_{PbS} + 2\,\frac{dx}{dT}\,L + C_{p,\,S_2} - 2\,C_{PbS} - 2\,x\,C_{PbS} = 2\,C_{Pbfl} + 2\,\frac{dx}{dT}\,L + C_{pS_2} - 2\,C_{PbS}$. Die Lösungswärme von 1 Mol PbS dürfte, da die Schmelzwärme von 1 Grammatom Pb 1200 cal und die von 1 Grammatom S 300 cal beträgt, etwa 1500 cal sein. Die Größe $\frac{dx}{dT}$ ist von $T = 600$ bis $1100°$ etwa $1{,}10^{-4}$ und $\frac{dx}{dT} \cdot L$ etwa 0,15 cal, von $T = 1100$ bis $T = 1200$ ist $\frac{dx}{dT}$ etwa $5{,}10^{-4}$, die Größe $\frac{dx}{dT} \cdot L$ also etwa 0,8 cal. Zwischen $T = 1200$ und $T = 1\,00$ wird $\frac{dx}{dT}$ etwa 1.10^{-2} und $\frac{dx}{dT} \cdot L - 15$.

Wie die weitere Rechnung lehrt, kann aber selbst für dieses Temperaturgebiet noch genügend genau so gerechnet werden, als ob das Blei rein wäre.

13) E. D. Eastman u. W. H. Rodebush, J. Am. Chem. Soc. **40** (1918), 497.

14) Bornemann u. Hengstenberg, Metall u. Erz, **17** (1920), 313 u. 339.

15) Würden wir für C_{Pbfl} statt 7,04 den wegen der Löslichkeit von PbS um 0,15 cal scheinbar vergrößerten Wert nehmen, so würde dadurch Q_0 um 150 cal kleiner werden; würde man C_{Pbfl} ebenso steigen lassen, wie das einzig bekannte Beispiel für ein flüssiges Metall, nämlich Sn, dessen Atomwärme nach Pionchon (s. Landolt-Börnstein, 5. Aufl., S. 1248) von 250° C bis 1100° C von 6,90 auf 9,02 cal steigt, so würde $C_{Pbfl} = 7{,}04 + 0{,}0025\,(T - 600)$ und Q_0 würde um 450 cal kleiner werden.

16) Siehe Landolt-Börnstein, 5. Aufl., S. 1539; ferner Günther, Z. f. Elch. **23** (1917), 197.

17) F. Pollitzer, Z. f. anorg. Chem. **64** (1909), 141.

18) Siehe Landolt-Börnstein, 5. Aufl., S. 1486.

19) Siehe z. B. K. Jellinek u. R. Uloth, Z. f. phys. Chem. **119** (1926), 195, Gl. 6.

20) K. Jellinek u. A. Rudat, Z. f. anorg. Chem. **175** (1928), 318.

21) Siehe z. B. K. Jellinek, Lehrb. d. physikal. Chem., 2. Aufl. Bd. II, S. 509, Gl. 375.

22) A. Eucken in Müller-Pouillet, Lehrbuch d. Physik, Bd. III, 1 S. 647.

23) Es sind in Gl. 5 für $T = 0$ die C_p-Werte für 3 Freiheitsgrade der Translation und 2 bzw. 3 Freiheitsgrade der Rotation genommen, während die C_p-Ausdrücke in Gl. 1 rein empirische, nur für hohe T geltende sind.

24) Siehe z. B. K. Jellinek, Lehrbuch d. physikal. Chem., Bd. III.

25) Siehe Anmerkung 20.

26) Siehe K. Jellinek, Lehrbuch d. physikal. Chem., 2. Aufl., Bd. II, S. 510. Gl. 377.

Die moderne Bodenaufnahme im Dienste der praktischen Landwirtschaft

mit 3 Abbildungen und 2 Tabellen

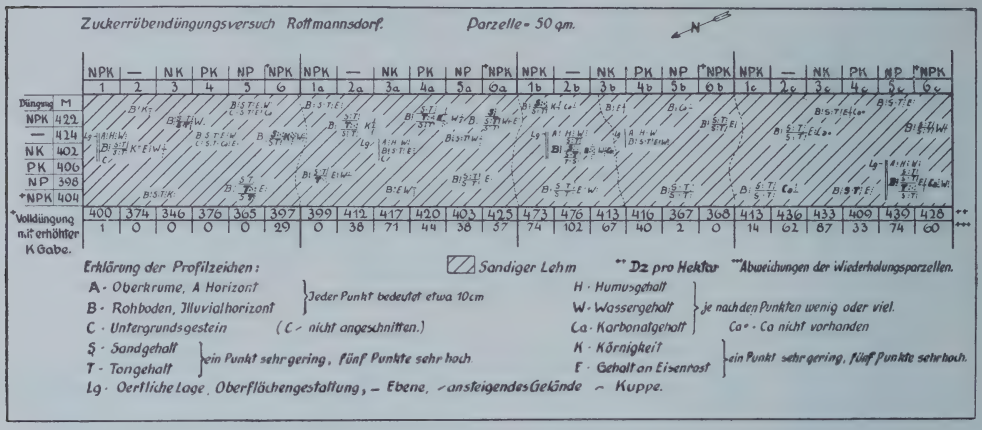
Von Prof. Dr. H. Stremme

Die heutige exakte Bodenkartierung [1]) vereinigt die Feststellung der Bodengesteinsart (Sand, Lehm, Ton usw.) nach Art der Preußischen Geologischen Landesanstalt (Methode A. Orths) mit der der Bodenentstehungstypen (Steppen-, Wald-, Grundwasserböden usw.) nach Art der russischen Schule. Bei der Guts- und Feldversuchskartierung sind die Bodengesteinsart und die Merkmale der Bodenentstehungstypen im dargestellten Bodenprofil innig miteinander verknüpft, während sie bei der Übersichtskartierung, bei der das Bodenprofil nicht direkt dargestellt wird, voneinander getrennt gehalten werden Beide Kartenarten dienen praktischen Zwecken, wenn auch nicht den gleichen.

Die Guts- und Feldversuchskartierung dient unmittelbar dem Gutsbetriebe. Hierbei kommt es in erster Linie auf die Beratung in ackerbaulicher Hinsicht an. Rein empirisch sagen Feldversuchskarten u. a., welche Bodeneigenschaften wichtiger sind als z. B. Sortenwahl und Kunstdünger. Starke humusreiche Oberkrume von gutem oder sehr gutem Wasserzustand wirkt positiv, geringe Krume, feste Horizonte, Trockenheit negativ. Dies sind Eigenschaften solcher Stellen, die gegenüber der durchschnittlichen Wirkungsweise der Kunstdünger oder den Sortenerträgen durchschlagen.

Von besonderer Bedeutung waren bei unseren Feldversuchsaufnahmen des Jahres 1925 zwei Düngungsversuche des Gutes Rottmannsdorf [2]), von denen in Abbildung 1 ein Zuckerrübendüngungsversuch wiedergegeben wird, der sehr lehrreich ist.

Der Versuch war — ausweislich der Zeichen für Lg (örtliche Lage) — auf einer schwachen Bodenwelle angelegt, deren Haupterhebung etwa die Mitte des Versuchsfeldes auf Wiederholung III neben II einnahm, während rechts und links davon das Gelände zu den ebenen Flächen der Wiederholungen IV und I abfällt. Der Versuch fällt durch die überaus gleichmäßige Oberkrume bei stark wechselndem Rohboden (B-Horizont) auf. Die Oberkrume wird stets angegeben mit gleichmäßigem, sandigem Lehm und den Profilzeichen A : H : W :, d. h. zirka 30 cm Mächtigkeit und gutem Humus-, normalem Wasserzustand. Auf dem bewegten Gelände heißt es, daß die gründliche Tiefkultur über alle Unebenheiten Herr geworden ist. Im Untergrund ist ein starker Wechsel vom reinen Ton über schweren Lehm, leichten Lehm, lehmigen bis reinen Sand, ja Kies vorhanden, der sich bei anderen Versuchsfeldkarten auch in der Oberkrume bemerkbar macht. Hier ist aber



Bodenkarte des Rübendüngungsversuches Rottmannsdorf

Abb. 1

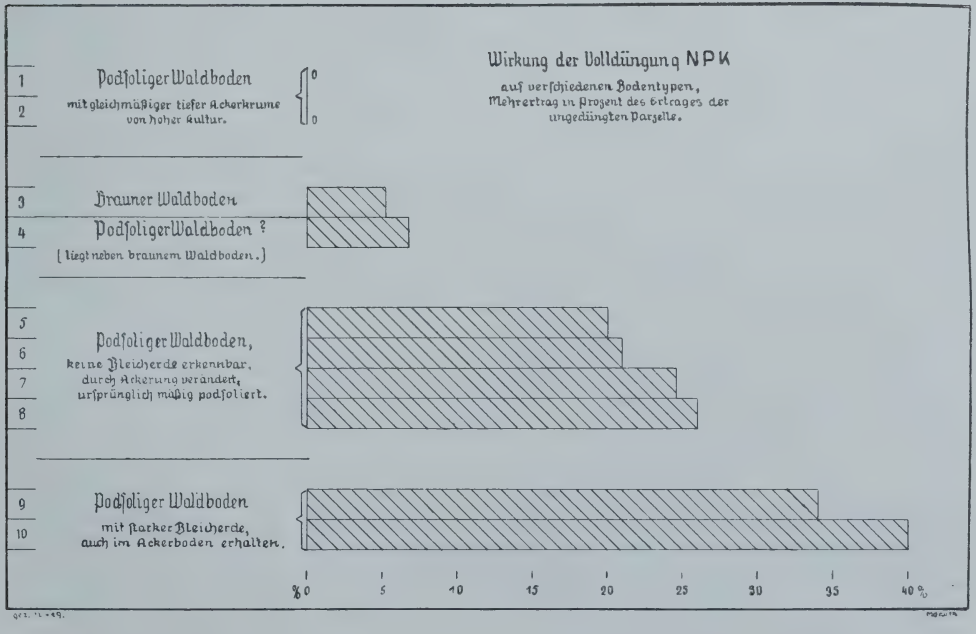
die gute Kultur auch dieser Unregelmäßigkeiten Herr geworden. Im Ertrag der Parzellen sind sie nicht zu spüren. Dagegen ist eine besonders unter der Bodenwelle auftretende Eigenschaft des Rohbodens von deutlicher starker Wirkung gewesen. In B-Horizont ist hier Ca : oder Ca ⁝ unmittelbar unter der Krume angegeben, ferner einmal kein Eisenrost (E), ein anderes Mal dagegen E $\frac{\vdots}{\cdot\cdot\cdot}$, d. h. eine harte Rostknolle. Der Rohboden ist hier durch aufgestiegenes Wasser, das besonders in der Bodenwelle und auf ihrem westlich gerichteten Hange verdunstet ist, welche beiden den herrschenden Westwinden besonders ausgesetzt sind, kalkhaltig geworden. Diese Eigenschaft hat einen erheblichen Mehrertrag (von zirka 20 % in der Bodenwelle, weniger auf der westlichen Fläche gegenüber der östlichen) hervorgerufen. Auf anderen Karten ist der aufgestiegene kohlensaure Kalk von Zuckerrüben nicht immer ausgenutzt worden, so daß auch diese Ausnutzung auf die gute gleichmäßige Bearbeitung der Krume zurückzuführen ist, die ein schnelles Wachstum der Rüben bis zum Kalkhorizont ermöglicht hat.

Fragt man nach der Wirkung der Kunstdünger und nach der Höhe der Erträge auf diesem Boden, so läßt sich wohl mit Sicherheit feststellen, daß die Kunstdüngergaben ohne sichere Wirkung geblieben sind. Dreimal hat die ungedüngte Parzelle höheren Ertrag als die Volldüngungsparzelle. Das viertemal (I) ist nur eine geringe Wirkung erkennbar. Die ziemlich starken Unterschiede der einzelnen Parzellen haben mit den Kunstdüngergaben nichts zu tun. Die stärksten sind auf den kohlensauren Kalk des Rohbodens zurückzuführen. Der Durchschnittsertrag ist 415 Doppelzentner vom Hektar. Drei andere Zuckerrübenversuche auf anderen Gütern, ein Düngungs-, zwei Sortenversuche, hatten im Durchschnitt 342, 347 und 392 dz/ha. Der Rottmannsdorfer hat also wesentlich mehr. Er steht sogar den

besten Erträgen der Niederungsböden gleich oder nahe, die im Jahre 1926 bei der Kartierung von Feldversuchen im Danziger Werder festgestellt wurden [3]).

Dem ursprünglichen Bodentypus nach ist der Rottmannsdorfer Versuch als podsoliger Waldboden zu bezeichnen, der infolge der Ackerkultur den ursprünglich vorhandenen, aber nicht stark ausgebildeten Bleichhorizont verloren hat. Die beiden Zuckerrübenversuche mit 342 und 347 dz/ha gehören dem gleichen Typus an, während der Versuch mit 392 dz/ha durch das Vorkommen von schokoladebraunen Humusflecken im B-Horizont ausgezeichnet ist. Es ist brauner Waldboden. Dieser ist ein stark degradierter Steppenboden, der in den braunen Humusflecken des Rohbodens noch einen Überrest der ehemaligen starkhumosen, tiefen Steppenkrume hat. Die podsoligen Waldböden haben auch diesen noch verloren, oder sie können direkt als podsolige Böden entstanden sein.

Aus der Ukraine ist bekannt [4]), daß die Erträge von Weizen und Roggen mit dem Grade der Podsolierung abnehmen. Höher als bei podsolierten Typen sind die bei Steppenboden und degradiertem Steppenboden. Die Getreidearten sind Steppenpflanzen. Die Runkelrübe ist nach W. Wangerin eine Pflanze der Vor- oder Waldsteppe, dürfte also an sich auf dem braunen Waldboden, der ein stark degradierter Boden der Waldsteppe ist, besser gedeihen als auf den podsoligen Böden des Regenwaldes. Wenn nun der Ertrag des Rottmannsdorfer Bodens, obwohl kein



Vergleich der Volldüngewirkung auf verschiedenen Waldbodentypen

Abb. 2

brauner Waldboden, besser ist als der eines braunen Waldbodens, so kann daraus hervorgehen, daß der Rottmannsdorfer Ertrag ebenfalls auf die besonders gute Ackerkultur zurückzuführen sei [5]). Allerdings ist hier die unbekannte Sorte u. U. auch von durchschlagender Bedeutung.

Unter den von R. Storp aufgenommenen Feldversuchen des Jahres 1925 waren 10 Düngungsversuche. Die nachstehende Tabelle gruppiert diese nach dem Grade der Wirkung der Volldüngung.

Ergebnisse von 10 Feldversuchsaufnahmen des Kreises Danziger Höhe

	Ort	Fruchtart	Bodenart	Bodenentstehungstypus	Wirkung der Volldüngung in % des Ertrages der ungedüngten Parzelle		Prozentischer Anteil der Einzelwirkung an der Gesamtwirkung der Volldüngung: N		K		P		Ertrag der ungedüngten Parzelle dz/ha	
1	Rottmannsdorf	Zuckerrüben	sandiger Lehm	Podsoliger Waldboden mit gleichmäßiger tiefer Ackerkrume von hoher Kultur	0		—		—		—		415	
2	Rottmannsdorf	Hafer	stark lehmigerSand		0		—		—		—		70	
3	Schwintsch	Kartoffeln	lehmiger Sand	Brauner Waldboden	5,1	5,9	60	71	25,9	19,5	14,1	9,5	266	288
4	Pietzkendorf	Kartoffeln	lehmiger Sand	Podsoliger Waldboden? (liegt neben braunem Waldboden)	6,6		82		13		5		310	
5	Dreilinden	Kartoffeln	lehmiger Sand bis schwach lehmiger Sand	Podsoliger Waldboden; keine Bleicherde erkennbar, durch Ackerung verändert; ursprünglich mäßig podsoliert	20	23	40,9	48	24,5	26	34,6	26	224	254
6	Senslau	Kartoffeln	stark lehmigerSand bis sandiger Lehm		21		50		25		25		242	
7	Senslau	Kartoffeln	lehmiger Sand		24,6		41,8		33,5		24,7		297	
8	Sobbowitz	Zuckerrüben	sandiger Lehm bis lehmiger Sand		26		58,3		20,3		21,4		347	
9	Saskoschin	Kartoffeln	lehmiger Sand	Podsoliger Waldboden mit starker Bleicherde, auch im Ackerboden erhalten	34	31	33,5	65,1	46	24,5	20,5		250	
10	Sobbowitz	Hafer	lehmiger Sand		40,6		96,7		3,3		—		51	

Dabei heben sich 4 Gruppen deutlich heraus. Die beiden Rottmannsdorfer Versuche zeigen keine Düngewirkung. Ein Versuch auf braunem Waldboden hat

nur 5,1 % Wirkung; ein weiterer Versuch, der wegen schlechter Witterung und ungünstigen Wasserstandes etwas kursorisch behandelt werden mußte, 6,6 %. Ein unmittelbar daneben gelegener Sortenversuch ist brauner Waldboden, also dürfte auch der Düngungsversuch auf braunem Waldboden liegen. Vier Versuche auf podsoligen Waldböden, bei denen der Bleicherdehorizont durch die Ackerung verlorengegangen ist und wahrscheinlich von vornherein nur klein war, haben ziemlich übereinstimmend zwischen 20 und 26 %, i. D. 23.

Die beiden podsoligen Waldböden, bei denen die Bleicherde noch in 30—40 cm Mächtigkeit erhalten ist, haben i. D. 37 % Düngewirkung. Dies sind so starke Unterschiede, daß sie wohl typische Erscheinungen darstellen dürften. Dabei ist besonders bemerkenswert, daß sowohl die Fruchtart wie die Bodenart ohne Einfluß auf die Düngewirkung sind. Bei dem prozentischen Anteil der einzelnen Düngerarten sind nicht so deutliche Unterschiede erkennbar. Wohl läßt sich sagen, daß bei den podsoligen Waldböden die Wirkung von Kali und Phosphorsäure im allgemeinen stärker zu sein scheint als bei den braunen Waldböden, und zwar mehr der Phosphorsäure. Bei den Erträgen spielt wieder die Sorte (u. U. auch andere Eigenschaften) eine wichtige, nicht nachzukontrollierende Rolle. Doch ist der Abstand bei den Zuckerrüben (Rottmannsdorf 415, Sobbowitz 347) und beim Hafer (Rottmannsdorf 70, Saskoschin 50 Korn und Stroh) so erheblich, daß man auch hierbei an typische denken könnte; immerhin ist bei Sobbowitz und Saskoschin auch die Bodenart etwas leichter. Durchschlagend ist jedenfalls der Unterschied in der Gesamtwirkung der Dünger, der Volldüngung. Die graphische Darstellung Abbildung 2 läßt ihn stark hervortreten.

Hierbei ist ein Vergleich mit Erfahrungen in Rußland möglich, die von Prianischnikoff kartographisch dargestellt sind. P. Krische[6]) gibt nach dem hier nicht zugänglichen russischen Original eine Skizze wieder, die in der Abbildung 3 (S. 136) mit dem entsprechenden Teile unserer „Allgemeinen Bodenkarte Europas“[7]) kombiniert ist. P. Krische bemerkt zur Skizze Prianischnikoffs: „Während zunächst das südöstlich gelegene Schwarzerdegebiet bei der großen natürlichen Fruchtbarkeit des Schwarzerdebodens und dem trockenen Klima keine künstliche Düngung beansprucht, gehört das Hauptschwarzerdegebiet zu den Böden, die besonders leichtlösliche Phosphorsäure benötigen. Weiter nördlich kommen stickstoffbedürftige Böden vor.“ Diese sind nach unserer Skizze die podsoligen Waldböden und die benachbarten Gebiete der degradierten Steppenschwarzerde. Nicht düngebedürftig sind die Böden der trockeneren Steppe, von der südlichen Schwarzerde an, die in den tieferen Teilen schokoladebraun ist, bis zu den humusarmen Wüstensteppenböden. Die Hauptmasse der Schwarzerde reagiert nur auf Phosphorsäure, eine Erscheinung, die in den deutschen Schwarzerdegebieten nicht beobachtet worden ist. Im ganzen zeigt der Rottmannsdorfer Zuckerrübenversuch in der mangelnden Wirkung der Kunstdüngung die gleiche sehr günstige Eigenschaft, wie sie die Böden der trockeneren Steppe haben. Die schrittweise stärkere Wirkung der Volldüngung von den braunen Waldböden bis zu den stark podsolierten schließt sich an die Düngerwirkung bei den russischen Steppen-, Waldsteppen- und Waldböden an.

Im ganzen wird man sagen können: Die schrittweise Wirkung der Volldüngung dürfte ein wichtiges praktisches Kennzeichen der Vegetationsbodentypen (Steppen-, Waldsteppen-, Waldboden) sein, das durch besonders intensive, alte, hochstehende Ackerkultur (Rottmannsdorf) verändert wird. Andere für die Bonitierung wichtige Kennzeichen sind die verschieden hohen Erträge an den gleichen Feldfrüchten und die verschiedene Anbaumöglichkeit. Diese Eigenschaften werden in Deutschland besonders deutlich durch die Gegenüberstellung zweier extremen Gebiete wie der Magdeburger Börde mit ihrer Steppenschwarzerde auf den verschiedenen Bodenarten der Diluvialschichten und der Lüneburger Heide, in der alte Waldbedeckung zu einer völligen Auslaugung und Versandung der entsprechenden diluvialen Schichten geführt hat.

Diese krassen Unterschiede sind zum Teil bei dem „Schätzungsrahmen für das Ackerland" mitverwertet, den W. Rothkegel und H. Herzog[8]) bei der Reichsbewertung landwirtschaftlicher Betriebe eingeführt haben, wenn auch in der Hauptsache noch die Bodenart dabei ausschlaggebend ist. Das was wir als Bodenentstehungstypus bezeichnen, wird hierbei in der Hauptsache durch die eingehende Berücksichtigung des Klimas ersetzt. Dieses spielt unter den Hauptfaktoren der Bodenbildung eine große Rolle. Wenn wir diese insgesamt überblicken, so haben wir als

Hauptfaktoren der Bodenbildung

Vegetation (einschl. der Tiere und Kleinlebewesen)	sichtbare Faktoren von unmittelbarer Wirkung
Relief	
Grundwasser	
Gestein bzw. Bodenart	
menschliche Arbeit	
Klima	unsichtbare Faktoren von mittelbarer Wirkung.
Dauer des Vorganges	

Es liegt auf der Hand, daß wir bei unserer Kartierung überall auf die sichtbaren Faktoren von unmittelbarer Wirkung achten und diese mehr in den Vordergrund rücken als die unsichtbaren Faktoren von mittelbarer Wirkung, deren Wert für die Bodenbildung mehr auf theoretischem Gebiete liegt. Klima und Dauer des Vorganges wirken stets und überall mit, die besondere Ausbildung des Typus geschieht aber durch die genannten sichtbaren Faktoren von unmittelbarer Wirkung.

Ohne durch theoretische Vorstellungen dazu veranlaßt zu sein, sind mehrere meiner Mitarbeiter auf Grund ihrer Kartierungen zu einer begrenzten Reihenfolge der Böden in verschiedenen Gegenden gelangt.

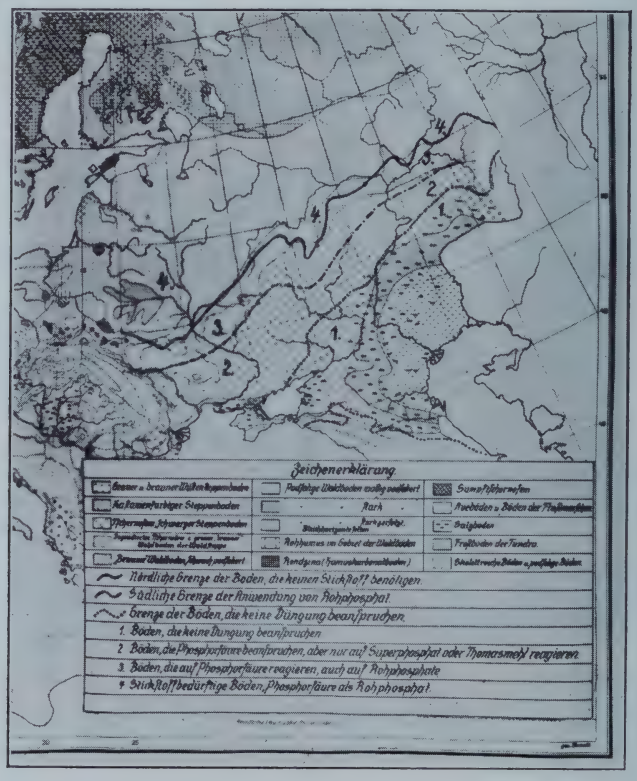
Bei der Kartierung des Gutes Krzyzanki in Posen hat W. Taschenmacher[9]) rein empirisch die folgende Einstufung der Böden vorgenommen (die Böden sind dräniert):

Reihenfolge der Bodenwerte auf dem Gute Krzyzanki

Nr.	Bodenart	Bodentypus	Kulturfähigkeit für Weizen	Luzerne	Rüben	Rotklee	Hafer	Gerste	Kartoffeln	Roggen
1a	Lehmböden	Podsoliger und gleipodsoliger Boden mit $\frac{A}{B}$ oder $\frac{A}{G}$ Profil, $\frac{}{C}$ kalkhaltig	sehr gut	sehr gut	sehr gut > 165 Ztr.	sehr gut	sehr gut > 18 Ztr.	sehr gut	—	Die Roggenerträge erreichen auf allen Böden nicht mehr als 10 Ztr. im Durchschnitt der Jahre
1b			sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	—	—	
1c		Grundwasserboden	sehr gut 18 Ztr.	—	sehr gut 200 Ztr.	—	sehr gut	—	—	
2		etwas anmooriger Boden, podsolig und gleipodsolig	gut	sehr gut	gut	sehr gut	sehr gut	gut 14–15 Ztr.	—	
3		brauner Waldboden	kleine Stelle in 2 und diesem ähnlich							
4		wenig ausgelaugter podsoliger Lehmboden	mittel	gut	gut	sehr gut	sehr gut 18–20 Ztr.	gut 14–15 Ztr.	—	
5		stärker	mäßig	gut	gut	gut	sehr gut	gut	—	
6		stärker	mäßig	—	mittel bis gut	—	sehr gut	—	—	
7		stark	mäßig	—	gut	—	gut	gut	—	
8	Lehmböden mit Sanddecke	podsolige Lehmböden mit Sanddecke	—	—	—	gut	—	mittel bis gut	sehr gut > 130 Ztr.	
9			schlecht	schlecht	schlecht	mäßig	schlecht	mittel bis gut	gut < 130 Ztr.	
10		etwas anmooriger Boden mit Grundwasserabsätzen	gut	—	gut	—	gut	gut	gut	
11	Sandböden	anmooriger Sandpodsolboden	—	—	z. T. gut	—	sehr gut	gut	sehr gut	
12		podsolige Sandböden, stark ausgelaugt	—	—	—	—	mäßig	mittelmäßig	gut > 100 Ztr.	
13			—	—	—	—	schlecht	schlecht	mittel < 100 Ztr.	schlecht

Zu dieser Tabelle ist zu sagen, daß sowohl die Bodenart wie der Bodentypus durch die Bezeichnungen auf der Karte im einzelnen genauer gekennzeichnet sind. Maßgebend für die Reihenfolge der Böden war die in den Jahren 1926 und 1927 beobachtete und vom leitenden Landwirt auf Grund der Wirtschaftserfahrungen ermittelte Kulturfähigkeit für die verschiedenen, auf dem Gute angebauten Nutzpflanzen. Sie läßt sich im großen Zuge mit den Bodenarten zusammenbringen. Aber innerhalb der viel umfassenden Gruppen der Bodenarten wird die Haupt-

gruppierung durch die Bodenentstehungstypen verdeutlicht. An erster Stelle kommen die dränierten lehmigen Grundwasserböden, die ursprünglich podsolig waren, aber durch das Grundwasser zunächst mit mächtiger anmooriger Krume versehen, dann nach der Dränage tschernosemähnlich und kalkhaltig wurden. Je weiter sich die



Die Wirkungsweise der Kunstdünger auf den Bodentypen im europäischen Rußland

Abb. 3

Böden von diesem besten Typus entfernen, desto geringer werden sie. Daraus ergab sich als wichtiges Meliorationsziel die Herstellung eines solchen Bodens auf der ganzen Gutsfläche.

Bei einer Gutsfläche von etwa 250 ha wird man von einem verschiedenen atmosphärischen Klima auf den einzelnen Schlägen nicht sprechen. Wenn man aus theoretischen Gründen beim Klima bleiben will, so spricht man wohl vom „Bodenklima“ und versteht darunter die Summe aller physikalischen Erscheinungen im Boden. Bei ihrer ungeheuren Veränderlichkeit wird man aber niemals imstande sein,

sie auf selbst einer kleineren Gutsfläche exakt zu bestimmen. Auf dem Gute Krzyzanki sind es Waldbodenbildung, Grundwassereinfluß und menschliche Arbeit (Dränage), die den Gesteinen der Diluvial- und Alluvialschichten ihr besonderes Bodengepräge geben. Das sind die unmittelbar sichtbaren Erscheinungen; das tägliche, jahreszeitliche und säkulare Klima wirken ebenso wie die Dauer der übrigen Faktoren beständig mit, ohne daß man sie in der gleichen Weise unmittelbar zu erfassen vermöchte. Dazu gehören längere meteorologische Messungen, buchmäßige Ermittlungen über das Alter der Rodung, der Dränage u. dgl.

Der Boden des Gutes Krzyzanki ist so eben, daß das Relief als bodenbildender Faktor nicht in Frage kommt. Die Bodenneigung bringt schon von 1 : 50 (von 1 m Gefälle auf 50 m Erstreckung) infolge der Abschwemmung durch die Niederschläge eine Verringerung der Krume und des Pflanzenertrages zustande, so daß bei 1 : 4 und darüber oft der Anbau nicht mehr lohnt. Es kommt oft der rohe Gesteinsuntergrund oder bei Waldböden der verdichtete untere Horizont zutage. Bei festen Gesteinen häufen sich die Skeletteile genannten Gesteinsbrocken zu Skelettböden an. Die guten humosen Krumenteile sammeln sich in Senken, so daß oft leidliche oder gute Böden mit entsprechenden Erträgen in den flacheren und hohlen Geländeteilen liegen, während die steileren schlecht sind[10]).

Auf Grund mehrmonatiger Übersichtskartierung der Bodenarten, Bodentypen und Ackerklassen im nordwestlichen und mittleren Hannover und in Braunschweig haben M. Sellke und P. F. Frhr. v. Huene[11]) die folgende vorläufige Klasseneinteilung vorgenommen (links die für Ackerböden, rechts die für Waldböden):

		Ackerböden	Waldböden (v. Huene)
Steppenschwarzerden[11]) und veränderte Steppenschwarzerden		Klasse I (ausnahmsweise II)	I
„Braune", sekundäre, auf Steppenboden entstandene Waldböden		Klasse II —V (überwiegend II und III)	II —IV
Primäre Waldböden (nicht auf Steppenboden entstanden)	schwach podsoliert	Klasse III—V	II —V
	mittel podsoliert .	Klasse IV—VI	III—V
	stark podsoliert .	Klasse V —VII	IV—VII
Rohböden (rohe B-Horizonte ohne Krume oder rohe Bodenarten ohne Typenbildung)		Klasse V —VII	IV—VII
Skelettreiche und Skelettböden		Klasse VI—VII	IV—VII

Hier ist ein etwas kleines Siebenklassensystem zugrunde gelegt, das die Grundwasserböden nicht berücksichtigt, weil sie ohne Dränage bei den Ackerböden zumeist in die niedrigsten Klassen kommen müssen, mit Dränage dagegen in die höheren, ja in die höchste. Bei Waldböden ist es zum Teil etwas besser.

Die Zurechnung der Waldböden zu den einzelnen Klassen ist in ähnlicher Weise durch die Bodenarten bedingt wie bei der Gutskartierung Krzyzanki, nur ist

in diesem Falle der Versuch gemacht worden, die Entstehungstypen als Hauptprinzip der Einteilung anzusehen.

Die Bodenentstehungstypen stehen mit den Bodenarten z. T. in einer gewissen inneren Beziehung: Im Walde führt die Bodenbildung in vielen Fällen zu einer Versandung der Oberkrume, ehemalige Waldböden sind daher auch auf schwererem Untergrunde (z. B. Geschiebemergel) oft sandig. Den Steppenböden gibt auch bei leichten Bodenarten die Krümelung oft den Charakter des milden Lehms. Tonige Absätze sind ein Kennzeichen vieler Grundwasserböden. Vollständig ist aber diese Zusammengehörigkeit nicht. Im ganzen hängt die Verteilung der mineralischen Bodenarten auch mit geologischen Tatsachen zusammen, während die Abhängigkeit der Bodentypen von den Bodenbildungsfaktoren ihnen die bodengesetzmäßige Verbreitung gibt. Die bodenkundliche Gesetzmäßigkeit schafft für die Bonitierung die überall gültigen und vergleichbaren Grundlagen, die somit den Bodentypen und nicht den Bodenarten zukommen. Ihr Fehlen bei den Bodenarten haben alle bisherigen Wertschätzungsarbeiten erwiesen.

Zusammenfassend läßt sich auf Grund der vorstehenden Erörterungen als Fortschritt über die früheren Bemühungen hinaus, die moderne Bodenkartierung der praktischen Landwirtschaft dienstbar zu machen, feststellen:

1. Sehr intensive Ackerkultur kann einen sonst nur mäßigen Waldboden so weit verbessern, daß er den besten Typen gleich oder nahe kommt.
2. Bei normaler Ackerkultur reagieren die Waldböden je nach dem Grade ihrer Podsolierung stufenweise auf die Volldüngung. Die Stufen sind: 1. braune Waldböden, 2. schwach bis mäßig podsolierte Waldböden, deren Bleicherde durch die Ackerung zum Verschwinden gebracht ist, 3. stark podsolierte Waldböden mit erhaltener Bleicherde.
3. Nach den bisher vorliegenden Guts- und Übersichtskartierungen gibt die Feststellung der Bodenentstehungstypen der Schätzung von Ackerböden die überall vergleichbare Grundlage, welche den Bodenarten fehlt.

Anmerkungen

1) H. Stremme, Grundzüge der praktischen Bodenkunde. Berlin 1926. — H. Stremme, Die Arbeiten des Mineralogisch Geologischen Instituts der Technischen Hochschule Danzig auf dem Gebiete der Bodenkartierung. Rektoratsrede, Danzig 1928.

2) Aufgenommen von R. Storp (Dissertation Danzig 1926). Der zweite Versuch war ein Hafermangeldüngungsversuch mit ganz ähnlichen Eigenschaften, aber kleiner angelegt und nicht so vielseitig. Ein dritter Versuch war ein Haferversuch mit erhöhten Volldüngungsgaben, der in bezug auf die Düngerverwendung den gleichen Mißerfolg hatte.

3) E. v. Meding, Dissertation Danzig 1927.

4) N. Florow, siehe Grundzüge pr. Bdkd. S. 70.

5) Für die in Betracht kommende Art der Ackerkultur wird auf O. Heuser, Grundzüge der praktischen Bodenbearbeitung, Berlin 1928, und W. Taschenmacher, Dissertation Danzig 1929, verwiesen. Die sämtlichen Versuche der übrigen Wirtschaften zeigen die Wirkung des Reliefs und wechselnder Bodenarten des Rohbodens auf die Krume und den Pflanzenertrag. Die Ackerkultur ist bei ihnen normal, während Rottmannsdorf sich durch besonders intensive und sehr alte auszeichnet.

6) P. Krische, Bodenkarten u. a. kartogr. Darstell. d. Fakt. d. landw. Produktion versch. Länder. Berlin 1928, S. 43, 46.

7) Allgemeine Bodenkarte Europas 1 : 10 000 000, im Auftrage der V. Kommission der Intern. Bodenk.-Ges. bearbeitet von H. Stremme. Danzig 1927.

8) W. Rothkegel und H. Herzog, Das Verfahren der Reichsfinanzverwaltung bei der Bewertung landwirtschaftlicher Betriebe. Berichte über Landwirtsch. N.-F. 10. Sonderheft. Berlin 1928.

9) W. Taschenmacher, Entwicklung und praktische Leistung der bodenkundlichen Gutskartierung mit dem Beispiel der Bodenaufnahme des Rittergutes Krzyzanki. Dissertation Danzig 1929.

10) Vgl. H. Stremme, Grundzüge usw. S. 40—50, 149—160, 211—230.

11) Wenn allerdings durch ungeeignete Bodenbearbeitung Pflugsohlen in der Schwarzerde auftreten, was z. B. in Rußland, in Rheinhessen, in der Rheinpfalz und anderwärts häufig ist, so bringt diese menschliche Arbeit die Schwarzerde um mehrere Stufen hinunter.

Versuche über das biologische Prinzip in der Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm

Von Dr. jur. et med. Gerhard Wagner

Das biologische Prinzip in der Abwasserreinigung hat neuerdings in dem an vielen Stellen, namentlich in England und Amerika, zur Anwendung kommenden „Schlamm-Belebungs-Verfahren" eine weitere Anwendung gefunden: Das von suspendierten Teilen mechanisch befreite Abwasser wird in kräftige Bewegung versetzt und mit Luft, also auch mit Sauerstoff, innig durchmischt; dadurch bildet sich ein Flockenschlamm von besonderer Form, Farbe und Größe der porösen Einzelteilchen. Die so entstehenden großen Oberflächen dienen der Adsorption der gelösten organischen Substanzen, die von einer sich gleichzeitig unter dem Einfluß der geschilderten ausgiebigen Belüftung bildenden Fauna und Flora kleinster Lebewesen bis zur Fäulnisunfähigkeit des Abwassers abgebaut werden. Neben dem physikalisch-chemischen Faktor der Flockenbildung und der damit zusammenhängenden Oberflächenwirkung spielt also offensichtlich ein biologischer Vorgang: die Bildung und Weiterzüchtung einer geeigneten Kleinlebewelt eine wesentliche Rolle. Bringt man einen Tropfen wirksamen Flockenschlamms unter das Mikroskop, so wird man in dieser Auffassung bestärkt; ein überaus vielseitiger Mikrokosmos zeigt sich: Vertreter der verschiedenen Bakterienformen, Kugel-, Stäbchen- und gelegentlich auch Schrauben-Bakterien, hier und da Fadenpilze und — durch ihre relative Größe, sowie durch ihre Beweglichkeit besonders ins Auge fallend — mancherlei Infusorien. Nach Kolkwitz kommen deren mehr als ein Dutzend verschiedener Arten in einem wirksamen „belebten" Schlamm vor. Sie gehören zum größten Teil zur Gruppe der Mesosaprobien, wie sie als mittlere Stufe der Selbstreinigung in mäßig verunreinigtem Wasser zu finden und als typisch für einen erfolgreichen Fortgang dieses komplizierten biologischen Vorganges bekannt sind.

Streng genommen bildet die Tatsache der Entwicklung einer derartigen Mikroorganismenwelt keinen Beweis für ihre ursächliche Beteiligung an den Reinigungsvorgängen in dem Abwasser, das sie beherbergt, aber unter Berücksichtigung ähnlicher Beobachtungen bei Rieselfeldern, künstlichen „biologischen" Abwässerkläranlagen, sowie angesichts der Tatsache, daß der Zusatz keimtötender Mittel den Reinigungsvorgang im Abwasser empfindlich stört, ist der kausale Zusammenhang nicht zu bezweifeln.

Daraus ergeben sich eine Reihe von Fragen biologischer Art, wie: Welche von diesen zahlreichen Arten von Kleinlebewesen sind am Reinigungsvorgang hauptsächlich beteiligt? Sind es bestimmte einzelne Arten? Findet ein Zusammenwirken statt, z. B. in der Richtung, daß etwa die Bakterien die organischen Substanzen soweit abbauen, daß sie den Infusorien als Nahrung dienen können oder leben letztere lediglich als Bakterienfresser im Abwasser?

Angesichts der Schwierigkeiten, die einzelnen Arten in Reinkultur zu gewinnen und so ihren Einfluß auf den Abwasserreinigungsvorgang zu studieren, dürfte zunächst eine einfachere Fragestellung gegeben sein: sind es die Protophyten — also die kleinsten pflanzlichen Lebewesen, insbesondere die Bakterien, oder sind es die Protozoen, die Urtierchen, die für den Erfolg der Abwasserreinigung maßgebend sind? Eine Beantwortung dieser Frage ist nicht nur von theoretisch-wissenschaftlichem Interesse, sondern sie kann auch zu dem praktischen — wenn auch vielleicht fernliegenden — Ziele beitragen, die Abwasserreinigung nicht nur lediglich den sich zufällig entwickelnden Lebewesen zu überlassen, sondern durch Beimpfung der Kläranlagen mit bestimmten Arten oder durch Einhalten bestimmter Mengenverhältnisse schnellere und zuverlässigere Reinigungsergebnisse zu erzielen. Die Erfolge der Mikrobiologie auf den verschiedenen Gebieten der Nahrungsmittelgewinnung sollten in dieser Richtung vorbildlich sein.

Eine Möglichkeit, die gestellte Frage zu beantworten, ist gegeben durch Zusatz von Chemikalien zur Kläranlage, die imstande sind, die eine oder die andere Gruppe von Kleinlebewesen zu unterdrücken. Während Stoffe, die Bakterien abtöten, Protozoen aber unberührt lassen, meines Wissens nicht bekannt sind, ist es sehr wohl möglich, durch Chemikalien die Protozoen — wenigstens in ihren vegetativen Formen — zu töten, ohne die Bakterien anzugreifen. Wohl als erster hat C. S. Stokvis gefunden, daß sich Zyankali — in der Konzentration von 0,1 % — in dieser Hinsicht eignet, und hat bei seinen Versuchen über die Selbstreinigung des Wassers von ihm Gebrauch gemacht. Später hat K. Kisskalt für seine Untersuchungen über die biologische Theorie der Trinkwasser-Sandfiltration sich mit Erfolg des gleichen Mittels bedient und außerdem auch Saponin und salzsaures Chinin — in einer Konzentration von 0,4 auf tausend — für den gleichen Zweck als brauchbar befunden.

Demzufolge habe ich im Laboratoriumsversuch geprüft, wie sich die Abwasserreinigung mit belebtem Schlamm gestaltet, wenn dem Zulauf entweder Zyankalium oder salzsaures Chinin zugesetzt wurde. Um einen besseren Einblick in die elektive Wirkung dieser Stoffe gegenüber den Protozoen zu bekommen, wurden Vergleichsversuche unter Zusatz von Desinfektionsmitteln mit allgemeiner keimtötender Wirkung, und zwar Chlorpräparaten, angeschlossen, von denen ich einen mit Antiformin (Natriumhypochloritlauge) ausgeführten für mitteilenswert halte.

Anordnung der Versuche

Eine 50 Liter fassende Modellkläranlage für belebten Schlamm nach dem von Sierp angegebenen Muster wurde nach ihrer Einarbeitung täglich — mit Ausnahme der Sonn- und Feiertage — mit 10 Liter aus Danzig-Langfuhr stammenden Kanalwasser beschickt, das mir das städtische Kanalbauamt (Vorstand: Herr Regierungs- und Baurat Troll) freundlichst zur Verfügung stellte. Die Haupteigenschaften dieses Kanalwassers waren folgende: es war nicht angefault, frei von Schwefelwasserstoff und enthielt beträchtliche Mengen Sauerstoff. Andererseits war es stark konzentriert; es verbrauchte im Durchschnitt etwa 2000 lmg. Kalium-

permanganat, wobei zu bemerken ist, daß alle in dieser Hinsicht hier angegebenen Werte, von der Kubel-Tiemannschen Vorschrift abweichend, um einen besseren Vergleich unter sich zu gewähren, unter Verwendung von 1 ccm Abwasser (und Ergänzung mit destilliertem Wasser auf 100 ccm) gewonnen wurden. Zugunsten der besseren Vergleichsmöglichkeit zwischen Zulauf und Ablauf mußte in Kauf genommen werden, daß die Werte ungewohnt hoch wurden, also einen Vergleich mit anderen Abwässern nicht zulassen. Das Abwasser war sehr trübe — seine Durchsichtigkeit blieb regelmäßig erheblich unter 1 cm bei Verwendung der Snellenschen Lesezahl Nr. 1. Auch der Bakteriengehalt war stets hoch: durchschnittlich 2 bis 3 Millionen im ccm, ebenso die Zahl der Kolibakterien mit durchschnittlich über 200 000 im ccm. Trotzdem war die Belastung der Kläranlage nur eine geringe, da die Zuflußmenge von 10 Liter täglich bei einem Fassungsvermögen von 50 Liter einen langen Aufenthalt des Abwassers im Klärbecken mit sich brachte — ungerechnet die durch die Sonn- und Feiertage bedingten „Ruhetage" des Klärprozesses, an denen keine Zufuhr von Kanalwasser erfolgte, dagegen die Lüftung unausgesetzt weiter erfolgte. Es war unter diesen — absichtlich sehr günstig gestellten — Bedingungen leicht, eine weitgehende Reinigung des Kanalwassers zu erzielen, die sich durch einen Reinigungseffekt von etwa 85 %, ein vollständiges Verschwinden der Fäulnisfähigkeit, eine weitgehende Klärung des Abflusses, völlige Mineralisierung der N-Substanzen und eine Herabminderung der Bakterien auf äußerst niedrige Werte kennzeichnet. Insbesondere war es unter den geschilderten Verhältnissen unschwer zu erreichen, daß nach dem jedesmaligen Einarbeiten der Anlage bald eine weitgehende Konstanz der Untersuchungsergebnisse eintrat, Störungen im Reinigungsvorgang, wie sie sonst bei kleinen Versuchsanlagen leicht vorkommen, also vermieden wurden; die bei den folgenden Versuchen beobachteten Störungen des biologischen Prozesses waren also unberechenbaren Zufällen kaum ausgesetzt.

War die Anlage gut eingearbeitet, wurde zum Versuch geschritten, und zwar wurde in dem hier wiedergegebenen Versuch I Zyankali — 5 g in 200 ccm Wasser gelöst — zugesetzt. Konzentration im Klärbecken also 1 : 10000, entsprechend der von Stokvis bei seinen Versuchen benutzten Verdünnung.

Im Versuch II wurden 20 g salzsaures Chinin — in 200 ccm Wasser gelöst — zugesetzt. Konzentration im Klärbecken also 1 : 2500, wie sie Kisskalt zu seinen oben erwähnten Versuchen als zweckmäßig erprobt hat. Zum Vergleich ist der Versuch III herangezogen, bei dem 750 ccm mit 2000 ccm Wasser verdünntes Antiformin zugesetzt wurden, also in etwa 1,5prozentiger Menge, wobei die Anwesenheit deutlicher Mengen freien Chlors mittels Jodstärkekleisters festgestellt wurde. Der Ablauf wurde täglich — mit Ausnahme der Ruhetage — untersucht, und zwar nach folgenden Gesichtspunkten:

1. auf seine Durchsichtigkeit — gegen Snellens Leseprobe Nr. 1;
2. auf seine Reaktion — ausgedrückt in P_H; Bestimmung mit der Indikatorenmethode nach Soerensen. Diese Untersuchung schien notwendig, weil durch chemische Zusätze bedingte, langdauernde, starke Abweichungen von der bei der Einarbeitung herrschenden Reaktion an sich schon

starke Beeinträchtigungen der Lebensvorgänge im Klärbecken mit sich bringen würden;

3. auf seine Fäulnisfähigkeit — gemessen an der Reduktion des Methylenblaus nach Weldert;
4. auf die Mineralisierung der N-Substanzen durch qualitativen Nachweis von Ammoniak, Nitriten und Nitraten;
5. auf die Oxydierbarkeit der organischen Substanzen durch Kaliumpermanganat (nach Kubel-Tiemann), wobei, wie bereits gesagt, insofern von der Originalmethode abgewichen wurde, als nur 1 ccm Abwasser in Versuch genommen wurde, da wechselnde Mengenverhältnisse geeignet sind, einen unzutreffenden Vergleich zu geben. Allerdings erwies sich im Verlauf der Versuche, daß diese Methode hier insofern versagen mußte, als die genannten Zusatzstoffe: Zyankali, Chinin und Antiformin an sich bereits stark oxydiert wurden. Es sind daher in den nachstehend mitgeteilten Ergebnissen diese Werte für die Zeit weggelassen worden, in der anzunehmen ist, daß eine nennenswerte Beeinflussung der Permanganatwerte durch diese Zusätze sich geltend gemacht hat;
6. auf die Keimzahl, in der üblichen Weise bestimmt durch Zählung der bei 21° binnen 48 Stunden in Gelatinegußplatten sich entwickelnden Kolonien;
7. auf die Zahl der Dickdarm(Koli)-Bakterien — durch Aussaat entsprechend verdünnter Mengen des Abwassers auf sogenannten Endo-Agar (Milchzucker-Fuchsin-Natriumsulfit-Agar), Abdünsten des Wassers im Faust-Heimschen Apparat, Bebrütung bei 37° während 24 Stunden und Zählung der fuchsinglänzenden, rotgewachsenen Kolonien;
8. mikroskopische Untersuchung des Flockenschlammes hinsichtlich des Verhaltens der Infusorien, namentlich bezüglich ihrer Beweglichkeit und ihrer Zahl.

Verlauf der Versuche

Die Ergebnisse sind in den Tafeln I, II und III zusammengestellt, und zwar tageweise, beginnend einige Tage vor dem Zusatz des betreffenden Mittels, um den Zustand des Klärprozesses vor dem Eingriff zu charakterisieren, und andererseits nachher solange, als bis die eintretenden Störungen sich wiederum ausgeglichen hatten.

In tunlichster Kürze zusammengefaßt, zeigen die Tafeln folgendes:

Versuch I (Zusatz von Zyankalium): Die Kläranlage war gut eingearbeitet; vielleicht, daß die Durchsichtigkeit des Ablaufes nicht so günstige Zahlen aufwies, wie zu anderen Zeiten. Im übrigen aber waren alle Zeichen einer weitgehenden Reinigung vorhanden. Im Mikroskop zeigte sich eine reiche, lebhaft bewegliche Fauna von Kleinlebewesen. Der Zusatz des Zyankali hob die Beweglich-

keit der letzteren schlagartig auf; ihre Zahl ging im Laufe der folgenden Untersuchungen sichtlich zurück. Erst nach einer Woche trat wieder eine Erholung ein, insofern sich bewegliche Formen in steigender Zahl zeigten. Dagegen verhielt sich die Bakterienflora in umgekehrter Weise: die Keimzahl stieg nach dem Eingriff binnen fünf Tagen von weniger als 1 Million auf 22 Millionen, um sodann gleichsinnig mit der Erholung der Protozoen, wobei der Einfluß eines Ruhetages anscheinend den letzteren zugute gekommen ist, schnell wieder auf die Ausgangswerte abzusinken. Entsprechend verhielten sich die Kolibakterien, die von durchschnittlich 40 im ccm bis zu 90 000 anstiegen und dann mit unwesentlichen Schwankungen wieder auf niedrige Zahlen — unter 100 — zurückgingen.

Die den Protozoen feindliche, die Bakterien aber schonende Wirkung des Zyankaliums ist mithin in ausgesprochener Weise zum Ausdruck gekommen, wobei die Lähmung beziehungsweise die Abtötung — oder zum mindesten Entwicklungshemmung — der Protozoen auf der einen Seite und die — wohl durch die Ausschaltung ihrer Antagonisten bedingte — überreichliche Entwicklung der Bakterien auf der anderen Seite einen starken Kontrast bilden.

Die Beeinflussung des Reinigungsvorganges war nicht minder deutlich, auch wenn man aus den geschilderten Gründen die Werte für den Permanganatverbrauch beiseite läßt: Der Abfluß war erheblich trüber als zuvor, es zeigte sich eine allerdings schnell vorübergehende und nur schwache Fäulnisfähigkeit, und namentlich war die Mineralisierung der N-Substanzen stark gestört, insofern bald Ammoniak und Nitrite sich zeigten, dagegen die Nitrate zurückgingen. Erst nach 20 Tagen trat in dieser Hinsicht wieder eine Rückkehr zu dem früheren Zustand ein — ein Zeichen der langen Nachwirkung der Störung in den biologischen Reinigungsvorgängen! Der Ausschlag der Reaktion nach der alkalischen Seite war nicht sehr erheblich und nicht von langer Dauer, kommt also als unmittelbare Ursache dieser Störungen kaum in Betracht.

Mithin das Ergebnis: Die Störung im Protozoenreiche wird begleitet von starker Bakterienentwicklung und in mehrfach sich äußerndem Nachlassen der Reinigungsvorgänge.

Der Versuch II — Zusatz von salzsaurem Chinin — verlief im großen und ganzen gleichsinnig mit dem vorigen Versuche. Auch hier zeigte sich gleichzeitig mit der sofort zu beobachtenden Störung im Leben der Protozoen ein schnelles Steigen der Bakterienziffern (von etwa 10 000 auf mehr als 1 Million) und ebenso der Kolizahlen (von weniger als 50 auf 7500), außerdem aber eine ausgesprochene Verschlechterung der Reinigungsvorgänge: geringere Durchsichtigkeit — sechsfache Verschlechterung! —, mangelhafte Mineralisierung der N-Substanzen und schließlich auch Steigerung des Permanganatverbrauches — zu einer Zeit, als eine direkte Beeinflussung durch das Chinin kaum mehr in Frage kam — auf etwa das Doppelte. Eine Fäulnisfähigkeit des Abflusses trat allerdings nicht in Erscheinung. Die Reaktion im Klärbecken war nur wenige Tage — und auch da nur geringfügig — nach der sauren Seite beeinflußt, so daß hierdurch die biologische Störung nicht erklärt werden kann. Die Dauer dieser Störung belief sich, soweit die mikroskopische Betrachtung in Frage kommt, auf mindestens 14 Tage;

danach waren auch die erwähnten Beeinträchtigungen der Abwasserreinigung verschwunden. Von gleicher Dauer war die durch schnelles Ansteigen und allmähliches Absinken gekennzeichnete Welle der Bakterien- und der Koli-Zahlen.

Der Versuch III — Zusatz von Antiformin — diente, wie oben ausgeführt, als Vergleich, der durch Zusatz eines alle Kleinlebewesen angreifenden Mittels ermöglicht werden sollte. Es wurde denn auch nicht nur das Leben der Protozoen sofort gelähmt, sondern auch die Zahl der bei 21° entwicklungsfähigen Keime, die zuvor mehr als 10 000 betragen hatte, sank sofort auf 2000 (die vielleicht aus für den Chlorzusatz unempfänglichen Dauerformen hervorgegangen waren), während die Kolibakterien — vorher etwa 100 im ccm — ganz fehlten. Überraschend schnell erfolgte aber die Erholung des bakteriologischen Lebens; schon am dritten Tage stieg die Keimzahl wieder auf mehr als 2 Millionen, die der Kolibakterien auf mehr als 100, um in beiden Hinsichten am sechsten und siebenten Tage Höchstwerte von 5,6 Millionen bzw. 30 000 in ccm zu erreichen. Bei den Protozoen dagegen war die Erholung wesentlich langsamer und erst nach wenigstens 14 Tagen wieder der alte Zustand erreicht; jedenfalls war das noch nicht der Fall, als längst freies Chlor im Abwasser nicht mehr nachweisbar war. Die Protozoenfauna mußte sich eben erst wieder heranbilden. Die Störung im Reinigungsvorgang verlief ebenfalls nicht zeitlich kurz wie die Beeinflussung der Bakterien, sondern etwa in der gleichen Frist, wie das Daniederliegen der Protozoenfauna.

Namentlich die Abweichung im Mineralisierungsvorgang dauerte lange, Ammoniak verschwand erst nach 14 Tagen, die Nitrite erst nach drei Wochen. Auch der Permanganatverbrauch, soweit er überhaupt verwendbar ist, blieb mindestens ebenso lange deutlich höher als vor der Chlorierung. Die Durchsichtigkeit war nach 14 Tagen auf der alten Höhe, allerdings hatte sich schon wesentlich eher eine Neigung zur Besserung gezeigt. Die Untersuchung auf Fäulnisfähigkeit verlief immer negativ. Die erhebliche Steigerung der Alkalinität war nur von kurzer Dauer.

Ergebnis: Die nur wenige Tage wirksame Chlorierung hatte eine langdauernde Lähmung der Protozoenfauna, sowie eine nachhaltige Störung der Abwasserreinigung zur Folge, während die Bakterien nach starker, aber schnell vorübergehender Schädigung sehr hohe Zahlen erreichten, die allmählich wieder absanken.

Besprechung der Versuche

Soweit überhaupt meine Versuche, die in ihrer Zahl und Anordnung, namentlich was die Untersuchungsmethodik des Abwassers angeht, noch allerlei — auch von mir empfundene — Wünsche offen lassen, geeignet sind, die gestellte Frage zu beantworten, lassen sie meines Erachtens nur die Deutung zu, daß den Protozoen eine ganz wesentliche Rolle bei der Reinigung der Abwässer zukommt.

Der Zusatz der gegen die Protozoen elektiv wirksamen Mittel, Zyankali und Chinin, hat übereinstimmend ergeben: Deutliche Beeinträchtigung der Reinigungsvorgänge während des Daniederliegens des protozoologischen Lebens; anderer-

seits gleichzeitig unbehinderte, ja übermäßige Entwicklung der Bakterien. Auch der Versuch mit Antiforminzusatz scheint mir im gleichen Sinne zu sprechen — trotz der zunächst gegen Protozoen und Bakterien gerichteten Wirkung des Chlors. Wäre die Abwasserreinigung lediglich eine Funktion des bakteriellen Lebens, so wäre anzunehmen, daß die Störungskurve der Abwasserreinigung gleichsinnig verliefe mit der Störungskurve der Bakterienzahl. Das ist aber nicht der Fall; sie ist am stärksten, wenn die Bakterien ihre höchsten Werte erreichen, und das ist der Fall, solange die Entwicklung der Protozoen gestört ist.

Im vorliegenden Schrifttum ist eine Abgrenzung der Rollen, die Bakterien einer- und Protozoen andererseits bei der Abwasserreinigung spielen, bisher nicht erfolgt. Durchweg scheint man die Vorstellung zu haben, daß die Bakterien die adsorbierten organischen Stoffe assimilieren, und daß die so entstehende Bakterienflora einer sich nunmehr entwickelnden Protozoenfauna als Nahrungsgrundlage dient.

Viel Aufmerksamkeit ist den Beziehungen des Flockenschlammes zu den Bakterien gewidmet worden. Letztere spielen vielleicht bei der Bildung der Flocken schon eine Rolle, da dieser Vorgang nach H. P. Eddy unter sterilen Bedingungen nicht stattfindet. Bei der Adsorption der gelösten organischen Stoffe aber kommt den Bakterien sicher eine Bedeutung zu, insofern sie die Flocken von den adsorbierten Substanzen befreien und damit das Adsorptionsvermögen wiederherstellen. Diese von H. P. Eddy, Imhoff, Sierp, Seiser u. a. vertretene Hypothese findet eine experimentelle Stütze in der von Reichle und Weldert angeführten Tatsache, daß bei Ausschaltung der Mikroorganismentätigkeit durch Zusatz von Chloroform eine weitere Reinigung des Abwassers eintritt, bis die Adsorptionskraft erschöpft ist. Es kann also als feststehend angesehen werden, daß ohne Mitwirken der Bakterien der Reinigungsvorgang bald zum Erliegen kommt. Andererseits geht aber aus meinen Versuchen hervor, daß nicht lediglich die Bakterien, sondern auch die Protozoen im Schlammbelebungsverfahren entscheidend mitsprechen. Worin besteht nun die Aufgabe der Protozoen?

Zwei Möglichkeiten scheinen mir gegeben: Zunächst wäre daran zu denken, daß sie sich ebenfalls an dem Abbau der adsorbierten organischen Substanzen beteiligen. Es ist bekannt, daß nicht alle Protozoen sich von geformtem Material ernähren, also z. B. von Bakterien, wenn das auch wohl der häufigere Fall ist (holozoische Ernährung nach Doflein), sondern daß manche Arten sich auch von gelösten Bestandteilen ernähren, und zwar vorwiegend von hoch zusammengesetzten organischen Verbindungen, so die Saprozoen. Der Verlauf aller meiner Versuche zeigt aber, daß die Störung der Protozoen sofort von einem starken Steigen der Bakterienzahlen begleitet war. Daraus kann man schließen, daß die Protozoen vor ihrer Schädigung die Zahl der Bakterien verringert haben, daß es sich also vorwiegend um Bakterienfresser handelt. Das stimmt auch mit allen Erfahrungen auf dem Gebiete der Selbstreinigung der Flüsse (Stokvis), der langsamen Sandfiltration (Kisskalt) und der Abwasserreinigung durch biologische Tropfkörper (Gemünd) überein. Es scheint mir daher die zweite Möglichkeit wahrscheinlicher, daß die Rolle der Protozoen in einer Regelung des Bakterienwachstums besteht. Es ist offenbar nicht so, daß, je größer die

Zahl der Bakterien, um so besser der Reinigungseffekt ist. Wäre das der Fall, dann müßte ja in meinen Versuchen das starke Ansteigen der Bakterienzahlen nach der Schädigung der Protozoen mit einer besonders guten Reinigung des Abwassers einhergehen. In Wirklichkeit ist aber das Gegenteil der Fall! Das zwingt zu dem Schluß, daß nur eine begrenzte Zahl von Bakterien den optimalen Reinigungserfolg gewährleistet, und daß mithin die Aufgabe der Protozoen eben in dieser Begrenzung des Bakterienwachstums zu suchen ist. Es ist also offenbar ein biologisches Gleichgewicht im Kampfe zwischen Protozoen und Bakterien für die Wirkung des belebten Schlammes notwendig.

Die gleiche Meinung äußert Kolkwitz: Bei Überlastung biologischer Anlagen tritt eine übermäßige Vermehrung der Bakterien ein, die den Aktivierungsprozeß nachteilig beeinflussen, wahrscheinlich durch zu intensive Einwirkung ihrer Ausscheidungsprodukte oder durch das dichte Zusetzen der peripheren Poren der Kolloidsubstanzen. Kolkwitz folgert weiter, daß, wenn diese Vorstellung richtig ist, offenbar die Tätigkeit der als „Beiorganismen" betrachteten Lebewesen darin besteht, das Übermaß der Bakterien durch Fressen oder Losreißen zu verringern. Kolkwitz kommt also zu der gleichen Schlußfolgerung, wie ich sie oben aus meinen experimentellen Ergebnissen abgeleitet habe. Jedenfalls aber dürfte erwiesen sein, daß die Protozoen nicht nur eine Begleiterscheinung in dem komplizierten Vorgang des Schlammbelebungsverfahrens darstellen, sondern als ein den Ablauf des biologischen Geschehens weitgehend beeinflussender Faktor anzusehen sind.

Literatur

1. H. P. Eddy, Gesundheitsingenieur 1922, Heft 2.
2. Doflein, Lehrbuch der Protozoenkunde, 3. Aufl., Jena 1911, S. 80 und 287.
3. Gemünd, Wilhelm, Hygienische Rundschau 1916, Bd. 26, S. 489.
4. Imhoff, K., Fortschritte der Abwasserreinigung, 2. Aufl., 1926.
5. Kisskalt, Karl, Zeitschrift für Hygiene usw. 1915, Bd. 80; 1917, Bd. 83, S. 5088.
6. Kolkwitz, R., Zur Biologie des aktivierten Schlammes. Bei: Reichle und Weldert a. a. O.
7. Reichle, C., und Weldert, R., Der gegenwärtige Stand des neuen biologischen Abwasserreinigungsverfahrens mit belebtem Schlamm. Kleine Mitteilungen des Vereins für Wasserversorgung usw., 3. Beiheft, April 1926, S. 46
8. Seiser, Adolf, Ergebnisse der Hygiene usw., Berlin 1928, Bd. 9. S. 343.
9. Sierp, F., Zeitschrift für angewandte Chemie 1926, Bd. 39, S. 1530.
10. Stokvis, C. S., Archiv für Hygiene 1909, Bd. 71, S. 46.

Versuch I: Zusatz von Zyankali

Datum / Tage:	Durchsichtigkeit (Snellen's Leseprobe Nr. 1) in cm	Reaktion [P_H]	Fäulnisfähigkeit (Reduktion v. Methylenblau)	Ammoniak (qualitativ bestimmt; Mengenverhältnisse geschätzt)	Nitrite (qualitativ bestimmt; Mengenverhältnisse geschätzt)	Nitrate (qualitativ bestimmt; Mengenverhältnisse geschätzt)	Kaliumpermanganat-Verbrauch (i. lmg)	Keimzahl (in Millionen im ccm)	Kolibakterien (Zahl im ccm)	Infusorien: (Beweglichkeit)	
3 vor	5	7,0	⌀	⌀	⌀	###	343	1	40	lebhaft	
2 „	5	7,0	⌀	⌀	⌀	###	320	0,06	20	„	
1 „	4,2	7,0	⌀	⌀	⌀	###	397	0,05	60	„	
Zusatz von Zyankali											
1 nach	5	7,2	⌀	⌀	+	###	nicht verwertbar	kein Ergebnis Verflüssigung der Gelatine	600	unbeweglich, an Zahl abnehmend	
2 „	2	7,3	⌀	#	+	###	„	5,6	3200		
3 „	1,8	7,3	⌀	#	+	⌀	„	5,6	7600		
4 „	2,5	7,3	nach 24 h.	###	+	Spur	„	7,1	42000		
5 „	2,3	7,5	nach 24 h.	###	+	#	„	22	90000		
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung										
7 nach	7,5	7,3	⌀	#	+	#	„	0,4	1000	Wiederauftreten beweglicher Formen	
8 „	11,5	7,3	⌀	#	+	###	„	0,3	75		
9 „	9	7,4	⌀	#	+	###	„	0,5	180		
10 „	10,5	7,2	⌀	#	+	###	„	0,4	140		
11 „	9,5	7,3	⌀	###	+	###	„	0,4	300		
12 „	10,5	7,2	⌀	Spur	+	###	„	0,6	200		
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung										
14 nach	6,5	7,0	⌀	Spur	Spur	###	366	0,78	160	Zunahme der beweglichen Formen	
15 „	10	6,9	⌀	+	+	###	439	0,08	36		
16 „	10	7,0	⌀	+	+	###	398	0,05	52		
17 „	8	7,4	⌀	#	+	#	436	0,04	40		
18 „	9	7,0	⌀	#	#	#	381	0,05	14		
19 „	6,5	7,0	⌀	Spur	+	#	420	0,01	620		
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung										
21 nach	9	7,0	⌀	⌀	+	###	377	0,04	30	lebhaft	
22 „	7	7,0	⌀	⌀	#	#	384	0,06	22		
23 „	5	7,0	⌀	⌀	Spur	#	440	0,04	40		
24 „	6	7,0	⌀	⌀	⌀	###	322	0,03	20		
25 „	5,5	7,0	⌀	⌀	⌀	###	335	1,0	2		
26 „	5	7,2	⌀	⌀	Spur	###	315	0,05	12		

Versuch II: Zusatz von salzsaurem Chinin

Datum Tage:	Durchsichtigkeit (Snellen's Leseprobe Nr. 1) in cm	Reaktion [P_H]	Fäulnisfähigkeit (Reduktion v. Methylenblau)	Ammoniak	Nitrite	Nitrate	Kaliumpermanganat-Verbrauch (i. Img.)	Keimzahl (in Millionen im ccm)	Kolibakterien (Zahl im ccm)	Infusorien (Beweglichkeit)
				(qualitativ bestimmt; Mengenverhältnisse geschätzt)						
4 vor	19	7,2	∅	∅	∅	----	309	0,005	10	viele sehr bewegliche Formen
3 „	29	7,2	∅	∅	∅	+	274	0,001	44	
2 „	29	7,2	∅	∅	∅	+	255	0,0009	36	
1 „	20	7,2	∅	∅	∅	+	289	0,016	4	
Zusatz von Chinin										
1 nach	7	7,0	∅	∅	∅	++	Ergebnisse nicht verwertbar	0,189 kein Ergebnis*)	120	Beweglichkeit durchweg stark herabgesetzt
2 „	5	7,0	∅	+	+	++			600	
3 „	5	7,0	∅	∅	Spur	++		0,47	7500	
4 „	5,6	7,0	∅	+	+	++		kein Ergebnis*)	7000	
5 „	26	7,1	∅	+	+	++	„	1,7	1800	
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung									
7 nach	28	7,1	∅	Spur	++	++	644	0,21	120	teils unbeweglich
8 „	21	7,2	∅	+	+	++	678	0,15	220	
9 „	23	7,2	∅	∅	++	++	618	0,25	2000	
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung									
11 nach	23	7,2	∅	∅	++	++	526	0,09	700	teils bewegliche Formen
12 „	25	7,2	∅	∅	++	++	498	0,39	480	
Ruhetag	Belüftung, aber keine Belastung									
14 nach	25	7,3	∅	∅	∅	++	510	0,38	300	desgl.
15 „	29	7,3	∅	∅	Spur	++	463	0,28	460	
16 „	29	7,3	∅	∅	∅	++	397	0,1	140	
17 „	29	7,3	∅	∅	∅	++	485	kein Ergebnis*)	1520	lebhafte Beweglichkeit
18 „	29	7,3	∅	∅	∅	++	414	0,175	140	
19 „	29	7,3	∅	∅	∅	++	395	0,063	60	

*) Infolge Verflüssigung der Gelatineplatten.

Versuch III: Zusatz von Antiformin

Tage:	Datum	Durchsichtigkeit (Snellen's Leseprobe Nr. 1) in cm	Reaktion [P_H]	Fäulnisfähigkeit (Reduktion v. Methylenblau)	Ammoniak (qualitativ bestimmt; Mengenverhältnisse geschätzt)	Nitrite	Nitrate	Kaliumpermanganat-Verbrauch (i Img.)	Keimzahl (in Millionen im ccm)	Kolibakterien (Zahl im ccm)	Infusorien (Beweglichkeit)	Freies Chlor qualitativ
6	vor	29	7,4	⌀	⌀	⌀	##	322	0,08	140	viele lebhaft bewegliche Formen	—
2	„	29	7,4	⌀	⌀	⌀	##	302	0,022	20		—
1	„	29	7,4	⌀	⌀	⌀	##	349	0,014	60		—
Zusatz von Antiformin												
1	nach	1	8,4	⌀	#	+	#	nicht verwertbar	0,002	0	alles leblos	##
2	„	1	8,4	⌀	#	Spur	##		0,012	216		#
3	„	1,5	7,8	⌀	#	Spur	#		2,38	100	einzelne bewegliche	+
Ruhetag		Belüftung, aber keine Belastung										
5	nach	1,5	7,7	⌀	#	+	#	nicht verwertbar	1,8	3000	einzelne bewegliche	Spur
6	„	2	7,6	⌀	##	⌀	+		5,6	17000		⌀
7	„	4	7,6	⌀	##	+	+		3,78	30000		⌀
8	„	10	7,6	⌀	##	+	⌀	„	3,4	6000	teils bewegliche, teils unbewegliche	⌀
9	„	9,5	7,6	⌀	##	#	+	1369 (?)	1,8	11000		—
10	„	10	7,6	⌀	##	Spur	⌀	1142 (?)	1,13	5000		—
Ruhetag		Belüftung, aber keine Belastung										
12	nach	16	7,6	⌀	##	##	#	489	0,63	12000	teils bewegliche, teils unbewegliche	—
13	„	20	7,6	⌀	##	##	##	516	0,49	4000		—
14	„	28	7,6	⌀	##	##	#	463	1,1	600		—
15	„	29	7,3	⌀	+	##	##	497	0,239	800	wenige Infusorien, aber mit gut. Beweglichkeit	—
16	„	29	7,3	⌀	⌀	##	##	433	kein Ergebnis*)	1600		—
17	„	29	7,3	⌀	⌀	##	#	421	0,491	3200		—
18	„	29	7,3	⌀	⌀	##	##	495	0,264	400		—
Ruhetag		Belüftung, aber keine Belastung										
20	nach	29	7,3	⌀	⌀	+	##	516	Kein Ergebnis*)	400	viele stark bewegliche Formen	—
21	„	29	7,3	⌀	⌀	+	##	495	Kein Ergebnis*)	300		—
22	„	29	7,3	⌀	⌀	Spur	##	491	0,134	100		—
23	„	29	7,3	⌀	⌀	⌀	##	421	Kein Ergebnis*)	75		—

*) Infolge Verflüssigung der Gelatineplatten.

Herstellung von sauerstoffreiem Stickstoff

Professor H. v. Wartenberg

§ 1. Um indifferente Gase wie N_2 von Sauerstoff zu befreien, pressen Kautsky und Thiele[1]) das Gas durch eine Säule von $Na_2S_2O_4$-Lösung. Diese ausgezeichnete Methode hat den Nachteil, daß die Lösung sich in einigen Tagen zersetzt und man das reine Gas also nicht immer parat hat. Ich habe früher[2]) 98prozentigen N_2 in einer kleinen Glasflasche (Dräger-Bombe) mit dem noch flüssigen 1prozentigen Na + K-Amalgam geschüttelt bei 100 Atm. Da aber jetzt hier nur mehr 92prozentiges Gas zu erhalten ist, reichte die Na-Menge nicht mehr zur Absorption aus und es mußte ein anderes schnelles Absorptionsmittel gesucht werden, was sich in der in der Gasanalyse üblichen Hempelschen Lösung von Cu''-Salzen in Ammoniumhydroxyd und -carbonatlösungen zusammen mit Kupfer fand.

§ 2. Da diese Lösung aber nur langsam O_2 absorbiert, wurde unter Verwendung einer Schüttelente versucht, durch systematische Veränderung der Zusammensetzung eine Beschleunigung zu erreichen. Eine große Reihe von Versuchen ergab als günstigste Lösung (10mal schneller als die Hempelsche wirkend) 25 ccm ges. NH_4-Carbonatlösung, 25 ccm konz. NH_4OH, 50 ccm Wasser und 10 g NH_4Cl. Schmilzt man diese Lösung mit blankem Kupfer samt einer Luftblase in ein Glasrohr ein, so beobachtet man auch nach Tagen noch eine schwach-bläuliche Färbung, d. h. es sind noch Cu''-Ionen da, die O_2-Absorption ist also vermutlich auch noch nicht „vollständig". Die Reduktion der Lösung und damit ihr Absorptionsvermögen läßt sich steigern durch Zugabe eines unedleren Metalles mit in NH_4OH-Lösung löslichem Hydroxyd. Zn schägt Cu nieder, aber eine Stange Sn entfärbt in der Tat die Lösung vollständig, ohne sich nennenswert dabei in ihrem Aussehen zu ändern. Will man viel O_2 absorbieren, so ist die Lösung bald an CuOH gesättigt, aber durch Schütteln läßt sich immer wieder eine blanke Oberfläche und weiterschreitende Absorption erreichen bis zum Aufbrauch des Cu (1 g Cu = ca. 177 ccm O_2). Zur Ausführung der Methode wird an einer 2-Liter-Bombe das Ventil abgeschraubt, 300 g Cu in 5 cm langen Stücken dicken Cu-Drahtes und eine Stange Sn hineingetan samt 300 ccm Lösung (ausreichend für 20 lit O_2, d. h. zur Reinigung von mit 100 Atm. hineingepreßtem 90prozentigem N_2). Die Flüssigkeit darf nicht so hoch reichen, daß sie beim Hinlegen der Bombe ausläuft, und womöglich nicht mit dem Ventil in Berührung kommen. Dann wird das Ventil mit etwas Hanfdichtung eingeschraubt und 100 Atm. N_2 eingelassen. Die Bombe wird jetzt auf vier leicht eingefettete Rollen gelegt (Möbelrollen), die auf ein Brett aufgeschraubt und leicht schräg gestellt sind. Hinten ist noch eine kleine Stütze angeschraubt, gegen die die Bombe beim Rotieren infolge der Schrägstellung der Rollen gepreßt wird. Das Brett wird auf dem Tisch, etwas überragend,

mit Zwingen befestigt und eine zu einem Heißluftmotor führende Schnur um sie herumgeschlungen. Nun läßt man die Bombe etwa 3 Stunden lang um sich selbst rotieren (zweimal in der min), wobei sie anfänglich infolge der raschen O_2-Absorption warm wird. Zum Schluß wird noch ein Rossignolventil auf das Hauptventil geschraubt und eine kleine Waschflasche mit verdünntem H_2SO_4 zur rapid erfolgenden Absorption des NH_3, und mit konzentriertem H_2SO_4 zum Trocknen vorgeschaltet. Bei Neufüllung mit frischem N_2 schüttet man zweckmäßig den

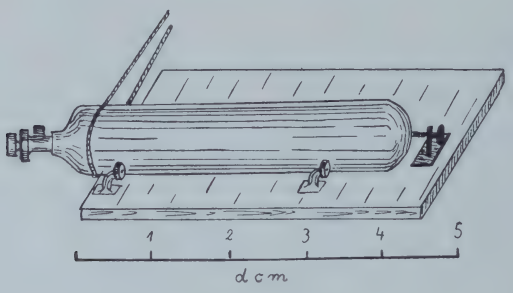


Fig. 1

Schlamm aus der Bombe aus und füllt neue Lösung ein, wenn auch die Cu-Menge zur Absorption der O_2 aus mehreren Füllungen ausreichen würde. Neu in Benutzung genommene Bomben reinigt man zweckmäßig erst durch Rotierenlassen mit Wasser und Kieselsteinen. Die komplexe Cu-Lösung greift das Eisen der Bombe nicht an, wie ja auch die technische Erfahrung lehrt, indem bekanntlich im größten Maßstabe bei der H_2-Herstellung aus Wassergas CO bei 200 Atm. mit einer derartigen Lösung in Stahlgefäßen absorbiert wird. Man kann übrigens mit Hilfe einer kleinen (½ lit) Bombe durch Wägen derselben (ca. 2 kg) den N_2 in gemessenen Mengen entnehmen. Eine solche Bombe faßt ca. 40 lit bei 100 Atm.; 10 ccm oder 0,5 ‰ wiegen 0,0125 g. Besitzt man also eine passende Wage, so kann man leicht die entnommenen Gasmengen ohne weitere rechnerische Reduktion bestimmen.

§ 3. Es wurde versucht, den nach der Absorption noch vorhandenen O_2-Rest zu bestimmen. Für die kleinen in Frage kommenden O_2-Konzentrationen gibt es Grenzmethoden wie die mit P oder Leuchtbakterien und eine quantitative, die beide angewandt wurden. Am bequemsten ist die Nebelfeststellung an P, die nach Strutt[3]) bei 10^{-3} % O_2-Gehalt ihre Grenze findet, und nicht wesentlich durch die Leuchtbakterien[4]) (Grenzen $0{,}7 \cdot 10^{-3}$ %) übertroffen wird. Da die Notiz von Strutt nur kurz ist, wurde die Angabe dadurch nachgeprüft, daß zu O_2-freiem H_2 elektrolytisch gemessene Mengen Knallgas gemischt wurden und das Gas langsam (1—2 lit/st) an einem auf einem Pt-Draht aufgespießten Kügelchen P bei 20—22° vorbeigeleitet wurde. Der H_2 war durch Überleiten über glühenden Pt-Schwamm von O_2-Spuren befreit, die Apparatur zusammengeschmolzen resp. mit einem Schliff versehen, jedenfalls nicht mit Gummischlauch verbunden. Es wurde bei seitlicher Beleuchtung gegen einen schwarzen Hintergrund die Nebelbildung beobachtet. Besondere Versuche zeigten, daß die Beobachtung des Nebels etwas

empfindlicher und hauptsächlich bequemer war als das üblicherweise benutzte schwache Aufleuchten. Am sichersten war, bei den kleinsten O_2-Konzentrationen, den Gasstrom für 1—2 min abzustellen, so daß das Gas ruhte. Die Resultate waren: waren:

Vol. % O_2	
$0{,}005_0$	sofort Nebelbildung
$0{,}002_6$	sofort Nebelbildung
$0{,}001_7$	2 min keine Nebelbildung
$0{,}002_2$	sofort Nebelbildung
$0{,}002_0$	2 min keine Nebelbildung
$0{,}002_0$	2 min unsichere Nebelbildung
$0{,}002_6$	sofort Nebelbildung
$0{,}003_0$	sofort Nebelbildung

Die Grenze liegt also bei $2 \cdot 10^{-3}$ % in genügender Übereinstimmung mit Strutt.

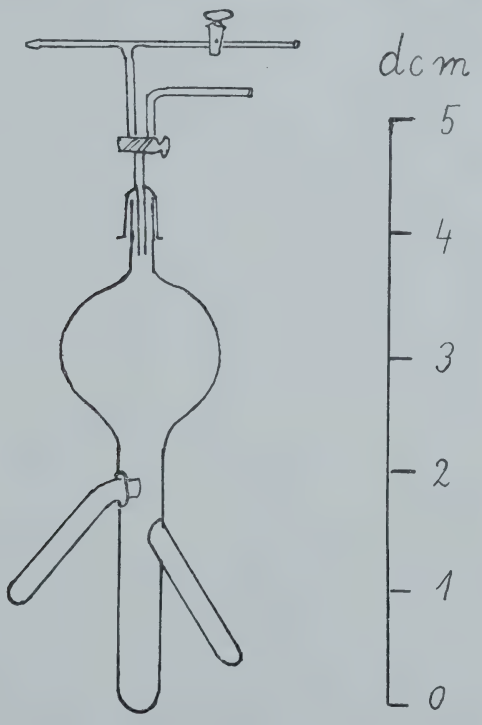


Fig. 2

Nach dieser Methode untersucht, zeigte der N_2 aus den Bomben 24 Stunden nach dem Schütteln, wenn er von dem die P-Reaktion schädigenden NH_3 durch H_2SO_4 befreit war, keine Nebelbildung, enthielt also weniger als 10^{-3} % O_2.

Hundertmal empfindlicher und quantitativ ist die O_2-Bestimmungsmethode von Hand[5]). Er läßt den O_2 auf Mn (OH_2) wie bei der Winklerschen O_2-Bestimmung in Wasser einwirken, löst in Säure, setzt Jodkalistärke zu und bestimmt kolorimetrisch die Jodmenge. Er benutzt dazu einen auf Hochvakuum ausgepumpten Apparat mit Hahntrichtern und eine geeichte Blauskala. Dieses Verfahren erschien für den hier vorliegenden vereinzelten Fall zu umständlich. Ein 1230 ccm fassender Ballon hatte nach Fig. 2 einen senkrecht nach unten gehenden und zwei seitlich in zueinander senkrechten Ebenen liegende Ansätze. In Nr. 1 kam 1,5 g NaOH + 1 g KJ + 10 ccm Wasser, in Nr. 2 10 ccm 13% HCl, in Nr. 3 0,5 g $MnSO_4$ (Fe frei!) + 7 ccm Wasser + 3,5 ccm HCl. In alle wurde noch ein Stück Al-Draht getan, die obere Schliffkappe, mit Ramsayfett gedichtet, aufgesetzt und auf einen gemessenen Druck an der Wasserstrahlpumpe evakuiert. Der Al-Draht löste sich unter H_2-Entwicklung und spülte die Lösungen luftfrei. Nun konnte ein- oder mehrmals der zu untersuchende Stickstoff eingelassen und wieder bis zu einem bekannten Druck (20 mm) ausgepumpt werden. Dadurch wurde die ursprünglich im Ballon vorhandene O_2-Menge jedesmal auf das 0,026-fache verdünnt. Überschritt die beobachtete O_2-Menge die so berechnete, so mußte der N_2 O_2-haltig gewesen sein. Zur Analyse wurde der Kolben so geneigt, daß der Inhalt von Nr. 2 in Nr. 1 floß und der weiße Schlamm, so gut es ging, in dem Ballon ausgebreitet und bis 40 St. stehen gelassen. Dann wurde die HCl aus Nr. 3 dazugegossen und die nunmehr luftunempfindliche Lösung ausgespült und mit n/100 $Na_2S_2O_3$ und Stärke mit einer 2 ccm Bürette, in 1/100 ccm geteilt, titriert. Die Lösung war mit bekannter Jodlösung unter denselben Konzentrationsbedingungen und KJ-Gehalt geeicht. Der Umschlag konnte auf rd. 0,02 ccm genau konstatiert werden. Da 1 ccm n/100 $Na_2S_2O_3$ $5{,}6 \cdot 10^{-2}$ ccm O_2 entspricht, ließen sich noch $1 \cdot 10^{-3}$ ccm O_2 beobachten, bei 1230 ccm Balloninhalt also rd. $1 \cdot 10^{-4}$ %. Die Resultate gibt folgende Tabelle, wobei unter „O_2 %ber." die Volumprozente angegeben sind, wie sie sich aus der mehrmaligen Evakuierung berechnen lassen unter der Voraussetzung, daß der nachgefüllte N_2 O_2-frei ist.

Absorptionsdauer St.	% O_2 ber.	% O_2 gef.
2	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$
8	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$
16	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$
21	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
5	$3{,}7 \cdot 10^{-4}$	$3{,}5 \cdot 10^{-4}$
22	$4{,}0 \cdot 10^{-4}$	$3{,}7 \cdot 10^{-4}$
40	$4{,}1 \cdot 10^{-4}$	$3{,}8 \cdot 10^{-4}$
12	$3{,}8 \cdot 10^{-4}$	$3{,}6 \cdot 10^{-4}$
15	$1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$
24	$1 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$

Bei allen Versuchen, bis auf die beiden letzten, wird etwas zu wenig O_2 gefunden. Nur bei den letzten wird $1 \cdot 10^{-4}$ % gefunden, gegenüber $0{,}1 \cdot 10^{-4}$ %

durch die Luft bewußt hinzugefügtem. Der Gehalt von $1 \cdot 10^{-4}$ % O_2 dürfte also dem wahren O_2-Gehalt des Gases entsprechen, jedenfalls der Größenordnung nach.

Zusammenfassung

Man kann N_2 bis auf mindestens 10^{-4} % von O_2 befreien, wenn man ihn mit metall. Kupfer in einer kleinen Stahlbombe bei 100 Atm. mit einer ammoniakalischen Salmiaklösung einige Stunden schüttelt. Die verschiedenen, kontrollierten Analysenmethoden zeigen, daß sein O_2-Gehalt jedenfalls kleiner als $7 \cdot 10^{-4}$ % ist und etwa $1 \cdot 10^{-4}$ % beträgt.

Anmerkungen

1) Kautsky und Thiele, Z. anorg. Ch. **152**. 342. 1926.

2) v. Wartenberg, Z. Elch. **27**. 162. 1921. **32**. 334. 1926.

3) Strutt, Phys. Z. *14*. 215. 1913. Heyne (Z. angew. Ch. *38*. 1101) gibt irrtümlich 10—5 % an in einer sonst guten Zusammenstellung.

4) Harvey, Naturwissenschaften. **12**. 166. 1924. Kautsky und Thiele, Z. anorg. Ch. **152**. 345. 1926.

5) T. Hand, J. Chem. Soc. London. **123**. 2573. 1923.

Über Derivate des Asparagindialdehyds.

Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dr. Ing. e. h. Alfred Wohl und Assistent Dr. Ing. F. Bernreuther.

Von den Dialdehyden der Vierkohlenstoffreihe sind bisher in der Literatur der Succindialdehyd nebst zahlreichen Derivaten [1]), der Maleindialdehyd mit Derivaten [2]) und vom Acetylendialdehyd das Tetraäthylacetal [3]) mit Sicherheit beschrieben und die Bildung des Fumardialdehyds [4]) wahrscheinlich gemacht worden. Von Disubstitutionsprodukten des Succindialdehyds ist das symmetrische Dibromderivat [5]) und eingehender der Weinsäuredialdehyd [6]) studiert. Dagegen liegen über die monosubstituierten Dialdehyde dieser Gruppe nur spärliche Nachrichten vor. So formuliert Marquis [4]) das bei der Nitrierung von Furan in Eisessig entstehende Produkt als das Monoenolacetat des Nitrosuccindialdehyds und Harries [5]) erhielt aus dem Dibromsuccindialdehyd durch Bromwasserstoffabspaltung bei der Destillation Monobromfumardialdehyd.

Gerade aber die Monosubstitutionsprodukte des Succindialdehyds, darunter vor allem der Äpfelsäuredialdehyd und noch mehr der Asparagindialdehyd sind wegen der in ihnen auftretenden Häufung der reaktionsfähigen Gruppen von hohem theoretischem Interesse.

Nun hatten Wohl und Jaschinowski [7]), in der Absicht, das Asparaginacetal herzustellen, aus dem Acetylendialdehydtetraäthylacetal durch Hydroxylaminaddition an die dreifache Bindung einen Körper erhalten, den sie als ein Hydroxylaminomaleinacetal ansprachen. Dieser Körper lieferte, allerdings in sehr schlechter Ausbeute, ein Reduktionsprodukt. Dessen weitere Untersuchung wurde damals aufgegeben, um die Versuche an den entsprechenden Methylacetalen weiterzuführen. Von diesen konnte man, da häufig die Methylderivate vor den Äthylverbindungen den Vorzug leichterer Kristallisation voraushaben, eine bessere Kristallisationsfähigkeit erwarten.

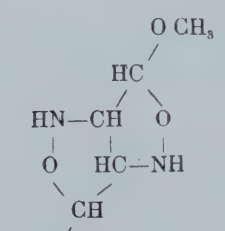
An dieser Stelle wurde die Arbeit neu aufgenommen. Es hat sich nun zwar, wie gleich hier bemerkt sei, im Laufe der angestellten Untersuchungen gezeigt, daß die dargestellten Methylacetale ebenfalls nicht zur Kristallisation zu bringen sind, dafür aber boten dieselben infolge ihrer niedrigeren Siedepunkte bessere Reinigungsmöglichkeiten.

Die vorliegende Versuchsreihe nahm ihren Ausgang vom Tetramethylacetal des Acetylendialdehyds (im folgenden kurz als Acetylenacetal bezeichnet). Die Darstellung dieses Körpers gelang in Anlehnung an die für die Darstellung des Äthylacetals bestehende Vorschrift [8]) aus Acetylendimagnesiumdibromid und Orthoameisensäuretrimethylester mit guter Ausbeute. Allerdings erwies sich dabei der Orthoameisensäuremethylester als bedeutend reaktionsträger als der betreffende Äthyllester und die Umsetzung mit der Acetylenmagnesiumverbindung trat erst bei stärkerem Erhitzen ein.

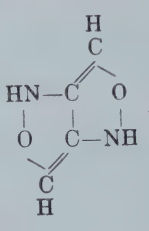
$$Br\,Mg\,C \equiv C\,Mg\,Br + 2\,CH\,(O\,CH_3)_3 = 2\,Br\,Mg\,O\,CH_3 + (CH_3\,O)_2\,CH\,C \equiv C\,CH\,(O\,CH_3)_2$$

Versuche, Ammoniak oder Phenylhydrazien an die dreifache Bindung im Acetylenmethylacetal anzulagern, verliefen ebenso ergebnislos wie ähnliche Versuche, die früher im hiesigen Institut[7]) mit dem Äthylacetal angestellt worden waren. Ähnlich wie es in der angeführten Arbeit beschrieben ist, konnte schließlich ein Hydroxylaminadditionsprodukt gefaßt werden.

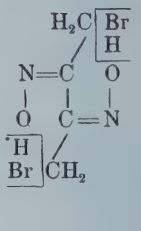
Als interessantes Nebenprodukt entstand bei der Einwirkung von freiem Hydroxylamin auf Acetylenacetal, je nach den Reaktionsbedingungen in wechselnder Menge, ein schön kristallisierter Körper $C_6H_{12}O_4N_2$. Seine Konstitution wurde nach Entstehung, Eigenschaften und Methoxylbestimmung gemäß Formel I angenommen. Er geht durch Behandlung mit konzentrierter Salzsäure unter Abspaltung von 2 Molekülen Methylalkohol in einen Körper $C_4H_4O_2N_2$ über, dem danach die durch Formel II dargestellte Struktur zukommen würde. Ihre Stütze finden die Formeln I und II in der Bildung von Isoxazol aus dem Propargylacetal und Hydroxylamin. Ein Versuch, den Körper II aus Dibromdiacetyl und Hydroxylamin über das Dioxim und Bromwasserstoffabspaltung daraus zu gewinnen (III), lieferte kein faßbares Ergebnis.



I.



II.



III.

Das Hauptprodukt der Hydroxylaminaddition an das Acetylenacetal war, wie bei den Versuchen von Wohl und Jaschinowski, eine dickflüssige, nichtkristallisierende Verbindung. Daß in derselben die beiden Acetalgruppen durch die Hydroxylamineinwirkung unangegriffen geblieben waren, wurde durch die Methoxylbestimmung bestätigt. Im Gegensatz zu der früher vertretenen Auffassung scheint dem Produkt jedoch nicht die Struktur als am Stickstoff substituiertes Hydroxylamin, sondern die eines Ketoxims zuzukommen. Dafür spricht, daß es weder Fehlingsche Lösung noch ammoniakalische Silberlösung reduziert. Seine ätherische Lösung reagiert heftig mit metallischem Natrium unter Wasserstoffentwicklung, seine wässrige Lösung nimmt Kupferoxyd unter Bildung einer stark komplexen Verbindung auf. Die Bildung eines Oximmethyläthers aus der Natriumverbindung des Körpers und Methyljodid soll noch genauer untersucht werden, da von diesem und dem isomeren Methylisoxim noch weitere synthetische Möglichkeiten auf diesem Gebiet zu erwarten sind.

Die Reduktion der Oximgruppe zur Aminogruppe konnte wegen der besonders starken Säureempfindlichkeit des Acetals nicht, wie sonst meist üblich, in saurer Lösung vorgenommen werden. Bei Versuchen in dieser Richtung trat stets vollständige Zersetzung der Ausgangssubstanz ein. Die Reduktion mit Palladium auf Tierkohle, Wasserstoff unter Druck und Erhitzen lieferte, in Übereinstimmung mit

den allgemeinen Erfahrungen über den komplizierten Verlauf der Oximreduktion unter diesen Bedingungen nur in ganz geringer Ausbeute eine destillierbare Base. Der Vorgang wurde deshalb nicht mehr weiter verfolgt. Weitere Versuche, die dahin zielten, die Oximgruppe durch Oxydation mit Kaliumpermanganat, salpetriger Säure oder Amylnitrit in die Karbonylgruppe überzuführen, um so zum Oxalessigsäuredialdehydacetal zu gelangen, verliefen ebenfalls ergebnislos.

Nachdem sich der gedanklich so naheliegende Weg, von der Hydroxylaminverbindung zum gesuchten Aminoacetal zu gelangen, als kaum durchführbar erwiesen hatte, wurde versucht, über das Maleinacetal durch Halogenwasserstoffaddition und nachfolgendem Ersatz des Halogens durch die Aminogruppe zum Ziele zu gelangen.

Die Reduktion des Acetylenacetals zum Maleindialdehydtetramethylacetal (kurz Maleinacetal genannt) wurde in Anlehnung an die für die Reduktion des Acetylenäthylacetals zur entsprechenden Äthylenverbindung bestehende Vorschrift [9]) mit ausgezeichneten Ausbeuten durchgeführt. Eine bis zum Succinacetal weiterschreitende Reduktion war bei den gewählten Versuchsbedingungen niemals festzustellen. Die Wasserstoffabsorption kam praktisch vollkommen zum Stillstand, wenn die für die Bildung des Maleinacetals berechnete nebst der vom Katalysator aufgenommenen Wasserstoffmenge verbraucht war.

In einem kleinen Nebenversuch wurde aus dem Maleinacetal freier Maleindialdehyd hergestellt und dieser mit Hydrazinhydrat umgesetzt. In glatter Reaktion und mit guter Ausbeute entstand dabei Pyridazin. Der Vorgang, der zugleich als ergiebige und einfache Pyridazindarstellungsmethode von Wert sein wird, kann wohl als eine weitere Stütze der cis-Stellung der beiden Aldehydgruppen[10]) angesehen werden.

Untersuchungen, die früher im hiesigen Institut mit dem Maleinäthylacetal angestellt worden waren, hatten nun gezeigt [11]), daß in dieser Verbindung die normalen Additionsreaktionen der Äthylenbindung, allerdings mit Ausnahme der Permanganatoxydation, ausbleiben. Unter dem Einfluß der beiden Acetalgruppen haben die beiden doppeltgebundenen Kohlenstoffatome ihre Restvalenzen im Maleinacetal derart weitgehend intramolekular kompensiert, daß keine Neigung zur primären Addition der üblichen Addenden mehr besteht. Eine vollkommene Analogie mit dieser intramolekularen Kompensation der Nebenvalenzen des doppeltgebundenen Kohlenstoffs mit der Acetalgruppe liegt in der bekannten Reaktionsträgheit des Halogens von halogenierten Acetalen vor, das in gleicher Weise seine Restvalenzen innerhalb des Moleküls festgelegt hat.

Läßt man nun Halogenwasserstoff auf das Maleinacetal einwirken, so wird sicher in Übereinstimmung mit den angeführten Erfahrungen zunächst an der Doppelbindung noch keine Addition erfolgen. Dagegen wird nach allem, was über die Addition von Halogenwasserstoff an Äther unter Bildung von Oxoniumsalzen im allgemeinen und über die Säureempfindlichkeit der Acetale im besonderen bekannt ist, sich derselbe sogleich am Äthersauerstoff der Acetalgruppe anlagern.

Ob eine derartige Addition an einer oder sofort an beiden Acetalgruppen erfolgt, ob weiterhin das primär entstehende Oxoniumsalz unter den vorliegenden Bedingungen bereits unter Methylalkoholabspaltung in einen halogenierten Äther übergeht, ist zunächst von geringerer Bedeutung, soll aber des allgemeinen Interesses wegen gelegentlich noch durch besondere Versuche geprüft werden. Auf alle Fälle ist durch diese erste Einwirkung des Halogenwasserstoffs auf die Acetalgruppe deren hemmender Einfluß auf die Kohlenstoffdoppelbindung aufgehoben und es kann nun die Bildung des normalen Additionsproduktes an die Doppelbindung erfolgen.

Für die Halogenwasserstoffaddition wurde Bromwasserstoff verwendet, da die Bromverbindungen vor den Chlorderivaten die leichtere Austauschbarkeit des Halogens voraushaben, während die Anwendung von Jodwasserstoff wegen der Gefahr einer Reduktion etwa frei werdender Aldehydgruppen nicht ratsam erschien. Die Anlagerung von Bromwasserstoff ging in Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen sehr leicht vor sich und es konnte nach dem Bromgehalt des rohen Bromsuccinacetals eine Ausbeute bis zu 84 % berechnet werden.

Als besonders günstig erwies sich bei der Herstellung des Bromsuccinacetals die Vorsicht, den Überschuß an Bromwasserstoff nicht in der allgemein üblichen Weise durch Neutralisation zu binden, sondern durch Umsetzung mit Orthoameisensäuremethylester zu entfernen. Der Orthoesterüberschuß wirkt dabei gleichzeitig acetalisierend [12]) auf durch den Bromwasserstoff freigemachten Aldehyd bzw. das Halbacetal oder führt den bromierten Äther, dessen Bildung nach den vorstehenden Erwägungen auch möglich ist, in das Acetal zurück.

Die Methode, Halogenwasserstoff aus nicht wässrigen Lösungen durch Umsetzen mit Orthoameisensäureester zu entfernen, anstatt ihn, wie üblich, durch Neutralisieren mit Kalium- oder Kalziumkarbonat oder bestenfalls tertiären Aminen zu binden, wird wohl auch anderweitig von Nutzen und einer weiteren Anwendung fähig sein können, da die Reaktion vollkommen glatt verläuft, ein Alkalischwerden aber ausgeschlossen ist. Auch wird bei der Reaktion, wie bei der Neutralisation mit tertiären Aminen kein Wasser gebildet; vorhandenes Wasser wird sogar unter dem Einfluß der zunächst sauren Reaktion ebenso wie der Halogenwasserstoff durch Umsetzung mit dem Orthoester entfernt. Als Endprodukte der Umsetzung liegen schließlich nur Alkylformiat, Alkylhalogenid und Alkohol vor und diese können nebst etwaigem Orthoesterüberschuß leicht und vollständig durch Destillation, gegebenenfalls im Vakuum schon bei Zimmertemperatur entfernt werden.

Das Monobrombernsteinsäurealdehydtetramethylacetal (im folgenden kurz als Bromacetal bezeichnet) wurde nicht in reiner Form isoliert, da zunächst nur für seine Umsetzungsprodukte Interesse vorlag. Eine Reinigung durch fraktionierte Destillation im Vakuum scheint übrigens nach den vorliegenden Erfahrungen wegen der ziemlich in der Nähe liegenden Siedepunkte des Maleinacetals und in geringer Menge vorhandener Nebenprodukte schwierig.

Der Ersatz des Broms im Bromacetal durch die Aminogruppe wurde durch Erhitzen mit methylalkoholischem Ammoniak in großem Überschuß (60 Mol) bewirkt. Der Vorgang verläuft langsam und mit schlechter Ausbeute. Die Hauptmenge des Bromacetals wurde immer durch Bromwasserstoffabspaltung in Maleinacetal zurückverwandelt. Neben dem Maleinacetal entstand noch ein brom- und stickstoffreies

Acetal von etwas höherem Siedepunkt, das sich schwer von diesem trennen läßt, und über dessen Zusammensetzung infolgedessen noch keine Gewißheit besteht.

$$(CH_3O)_2\,CH \cdot CH\,Br \cdot CH_2 \cdot CH\,(O\,CH_3)_2 + NH_3 =$$
$$(CH_3O)_2\,CH \cdot CH \cdot (NH_2) \cdot CH_2\,CH\,(O\,CH_3)_2, H\,Br$$

Versuche, durch Zusatz von Jodkalium, Jodnatrium oder Cuprojodid den Bromaustausch zu beeinflussen[18]), ergaben keine Verbesserung, da, wie in einem Nebenversuch geprüft wurde, das Bromacetal auch bei lange dauerndem Erhitzen mit einem großen Überschuß von Jodnatrium sein Brom nicht in nachweisbarer Menge gegen Jod austauscht

Während durch Ammoniak aber immerhin noch etwas über ein Drittel des angewandten Bromacetals in ein Aminoderivat übergeführt werden konnte, verlief die Umsetzung der Bromverbindung mit Trimethylamin in Methylalkohol quantitativ im Sinne einer Bromwasserstoffabspaltung unter Rückbildung des Maleinacetals und bei Verwendung von verflüssigtem Dimethylamin konnte neben Maleinacetal nur eine Spur von stickstoffhaltigem Acetal gefaßt werden. Lediglich durch Behandlung mit wasserfreiem Piperidin in großem Überschuß ließ sich noch eine nennenswerte Austauschreaktion erzielen und es konnten so aus dem Bromacetal etwa 15 % der theoretischen Ausbeute an Piperidinosuccinacetal gewonnen werden.

Wie bei der Herstellung des Asparaginacetals wirkte auch bei diesem Umsatz eine Erniedrigung der Reaktionstemperatur günstig. Der Bromaustausch nimmt bei tieferer Temperatur gegenüber der Bromwasserstoffabspaltung zu.

Die in den angeführten Versuchen beobachtete und mit den allgemeinen Erfahrungen wohl im Einklang stehende geringe Beweglichkeit des Broms im Bromsuccinacetal zeigte sich weiterhin auch darin, daß weder mit aktiviertem Magnesium eine Organomagnesiumverbindung herzustellen noch durch Erhitzen mit Silberacetat ein Ersatz des Broms herbeizuführen war.

Das Amidobernsteinsäuredialdehydtetramethylacetal (Asparaginacetal) wurde rein über das Oxalat gewonnen. Es wurde von ihm das schön kristallisierte Platinchloriddoppelsatz, die kristallisierte Benzoylverbindung und durch Methylierung das ebenfalls kristallisierte Chlorid des Trimethylasparaginacetals hergestellt und analysiert.

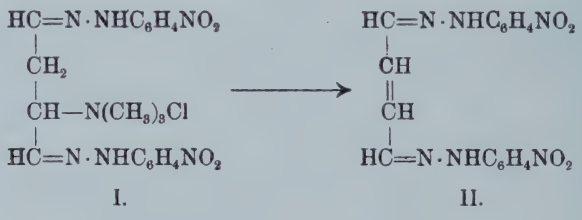
Für die Spaltung des Asparaginacetals, das gegen verdünnte Säuren relativ beständig ist, wurde die Methode von E. Fischer mittels conc. Salzsäure in der Kälte als die zweckmäßigste erkannt. Der Sirup des salzsauren Dialdehyds war nicht zur Kristallisation zu bringen, ebensowenig kristallisierte das Platindoppelsalz desselben erkennbar. Ein Dioxim und ein Disemicarbazon konnte nicht isoliert werden, da die fraglichen Substanzen sich infolge ungünstiger Löslichkeitsverhältnisse nicht von dem überschüssigen Hydroxylamin- bzw. Semicarbazidchlorhydrat trennen ließen. Dagegen konnte die Frage, ob der freie Dialdehyd oder dessen mögliches Kondensationsprodukt zu einem Dihydropyrazindiacetaldehyd vorlag, durch Herstellung eines kristallisierten bis-p-Nitrophenylhydrazin-chlorhydrats eindeutig zugunsten des nicht kondensierten Asparagindialdehyds geklärt werden.

Der freie Aminodialdehyd erwies sich als höchst unbeständig. Seine wässrige Lösung schied nach wenigen Stunden ein Kondensationsprodukt des Aldehyds in gallertigen Flocken ab.

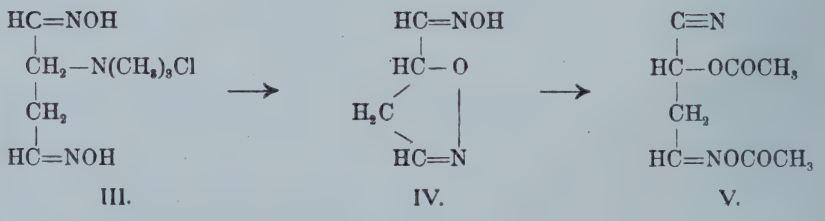
Die bei der Spaltung des Piperidinosuccinacetals und des Trimethylasparaginacetal-chlorids enthaltenen salzsauren Dialdehyde kristallisierten nicht. Vom Piperidinosuccindialdehyd wurde das Platinchloriddoppelsalz und das bis-p-Nitrophenylhydrazon-chlorhydrat hergestellt.

In durchaus andersartiger Weise verliefen dagegen Versuche, aus dem Trimethylasparagindialdehyd-chlorid das Nitrophenylhydrazon und das Dioxim herzustellen. In beiden Fällen spaltete sich die Trimethylammoniumgruppe ab. Anstelle des dem angewandten Acetal entsprechenden Nitrophenylhydrazonchlorids (I) konnte rein nur Maleindialdehyd-bis-p-nitrophenylhydrazon (II) isoliert und durch Vergleich mit der aus dem Maleinacetal gewonnenen Verbindung identifiziert werden.

Anstelle des Dioxims (III) entstand eine Verbindung $C_4H_6O_2N_2$, die mit dem Maleindialdoxim von Wohl und Mylo[14]) und dem vermutlichen Fumardialdoxim von Marquis[15]) isomer, aber von beiden Substanzen durch ihre Eigenschaften charakteristisch verschieden ist. Ihre Konstitution wurde als das innere Anhydrid des Äpfelsäuredialdoxim, als Isoxazolin-aldoxim (IV) angenommen. Beim Erwärmen dieser Verbindung mit Essigsäureanhydrid geht die Aldoximgruppe in die Nitrilgruppe über und der Isoxazolinring wird unter Anlagerung eines Moleküls Essigsäureanhydrid zu einer Diacetylverbindung $C_8H_{10}O_4N_2$ (V) gespalten.



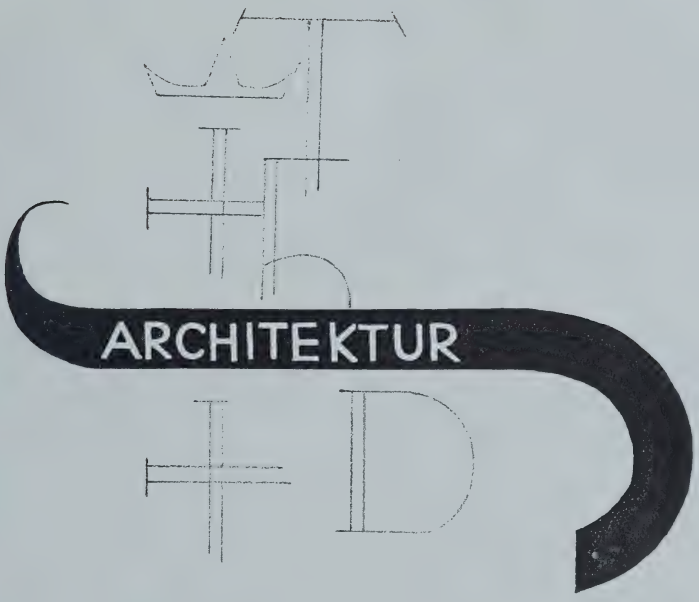
I. II.



III. IV. V.

Anmerkungen

1) Harries B. 31, 43 etc.; Wohl u. Schweitzer B. 39, 892.
2) Wohl u. Mylo B. 45, 340 u. 1746.
3) Jotsitch Bl. (3) 28, 922; Wohl u. Mylo B. 45, 339.
4) Marquis C. r. 134, 934; Wohl B. 45, 1748.
5) Harries u. Krützfeld B. 39, 3677.
6) Wohl u. Mylo B. 45, 341.
7) Wohl u. Jaschinowski B. 54, 472.
8) Wohl u. Mylo B. 45, 339.
9) Wohl u. Mylo B. 45, 340.
10) B. 45, 1742.
11) B. 54, 473, Anmerkung 1.
12) Claisen, B. 31, 1010.
13) Wohl B. 39, 1951.
14) B. 45, 1755.
15) A. ch. [8] 4. 239. (1905.)


ARCHITEKTUR

Das alte bürgerliche Wohnhaus in Danzig und den Niederlanden

Von Geh. Regierungsrat Professor Albert Carsten

Der Kern des nordischen Hauses ist die Diele. Aus dieser Keimzelle, mag sie im Bauernhaus oder im Stadthaus mit oder ohne gegenseitige Beeinflussung ihren Ursprung haben, entwickelt sich, bedingt durch örtliche Verhältnisse, Nutzungsart und Lebensgewohnheiten der Bewohner, das Haus des Bürgers im städtischen Bezirke. Zunächt ist die Diele in ihrer ursprünglichen Form als Einraum den verschiedenen Zwecken nutzbar gemacht worden, später aber spaltet sich diese Zelle der Grundfläche und der Höhe nach in mehrere Teile. Immer aber bleibt sie bis in das 17. Jahrhundert hinein der Ausgangspunkt und das bestimmende Element für die Grundrißanordnung des städtischen Wohnhauses in den nordischen Küsten-

Waag en Kaasmarkt te Alkmaar in de tweede Helft der 17de Eeuw
(aus Noord Holland in Beeld von Mrs. A. Loosjes)
Abb. 1

gebieten des europäischen Festlandes. Eine Gegenüberstellung und ein Vergleich der räumlich am weitesten getrennten Gebiete, der Niederlande und des Ostens, beispielsweise Danzigs, wohin schon früh eine starke Einwanderung von Westen her stattfand, wird zu einer Klärung grundsätzlicher Übereinstimmung der Hausformen und der im einzelnen vorhandenen Verschiedenheiten führen können.

Bei der in der Regel schmalen aber tiefen Baustelle des Hauses erhält die Diele die Grundrißform eines Rechteckes, dessen Schmalseiten nach der Straße und nach dem Hof zu liegen. Der darüber sich entwickelnde, mit einem Satteldach überdeckte und mit einem Vorder- und Hintergiebel ausgestattete Baukörper ergab einen in seinem Gesamtaufbau einheitlichen Typus und verlieh durch die Aneinanderreihung der einzelnen Giebelhäuser den Straßenzügen der niederdeutschen Städte, besonders auch Danzigs, das gleiche charakteristische Gepräge wie denen der Niederlande. Im einzelnen trennen sich jedoch die Wege, die die Entwicklung des Bürgerhauses in den verschiedenen Gegenden eingeschlagen hat. Was zunächst die Grundrißanlage betrifft, so zeigt das Danziger Haus eine Verwandtschaft mit dem niederländischen, dessen Voorhuis und Achterkamer dem großen Dielenraum und der hinteren, von ihm abgetrennten Stube des Danziger Hauses entsprechen. In den kleinen Küstenstädten Nordhollands bleibt der Charakter der Diele als Einraum, in den nur die Schlafkammern eingebaut sind, lange erhalten. Hier steht auch noch der Herd, gleichzeitig als Kochstelle und Wärmespender dienend. Eine derartig einfache Grundrißanlage ist in Danzig nicht nachweisbar, mag aber wohl im Mittelalter bei kleinen Anlagen auch hier die übliche gewesen sein. In Südholland und Flandern ist der Hausorganismus, bedingt durch die bessere Lebenshaltung, schon früh komplizierter und deckt sich nahezu vollkommen mit dem Danziger Hausgrundriß. Die in den Abbildungen 2 und 3 dargestellten Grundrisse eines Hauses in Middelburg zeigen eine Raumanordnung, wie sie die Danziger Patrizierhäuser aus dem 16. und 17. Jahrhundert aufweisen. Hier ist bereits die Küche aus der Diele verwiesen und in einen hofseitigen niedrigen Anbau verlegt. Eine Treppe, hier wie dort als Wendeltreppe ausgebildet, vermittelt, von der Diele ausgehend, den Zugang zu den oberen Geschossen, die je ein Vorder- und ein Hinterzimmer mit dazwischen liegendem Vorraum haben. Die schon im Mittelalter vorhandenen und sich später noch erweiternden Handelsbeziehungen zwischen Danzig und den Niederlanden mögen bei ähnlicher Lebenshaltung der Bewohner diese Übereinstimmung in der Raumanordnung herbeigeführt haben. Örtliche Verhältnisse sind aber dann doch wieder bestimmend für Abweichungen geworden. Die Unterbringung der Küche, nachdem sie einmal als störend in der Diele empfunden worden ist, hatte stets Schwierigkeiten gemacht. In Danzig wurde diese Frage schon bei Häusern aus der Mitte des 16. Jahrhunderts öfters so gelöst, daß das hintere, von der Diele abgetrennte Zimmer um einige Stufen gehoben wurde. Beide Räume verband dann eine Treppe, und unter der höher gelegenen Hinterstube ordnete man, von der Diele durch eine abwärts führende Stiege zugänglich, die Küche mit besonderem Ausgang zum Hofe an (vgl. Abb. 5). Um die nötige Raumhöhe zu schaffen, mußte der Fußboden der Küche in den Erdboden eingesenkt werden. Die ungünstigen Baugrundverhältnisse in den Niederlanden, die eine Anlage von Kellern selten ermöglichten, sind dort einer gleichartigen Lösung hinderlich gewesen. Die Zahl der Stockwerke, die über dem Dielengeschoß angeordnet

sind, ist verschieden. Bei den schlichten Schiffer- und Fischerhäusern Nordhollands legt sich das Dach unmittelbar über den Dielenraum. Zwei, zuweilen auch drei Obergeschosse zählt das üppige Haus des Handelsherrn schon im 16. Jahrhundert. Bei der geringen Breite der Baustelle ist die Dachkonstruktion eine verhältnismäßig einfache. Gemeinsam ist dem Danziger wie dem niederländischen Dachstuhl der Drempel. Dagegen ist ersterer als Kehlbalken-, letzterer als Pfettendach, wie es im Westen, besonders auch in Frankreich allgemein üblich war, konstruiert worden

Middelburg (Holland)

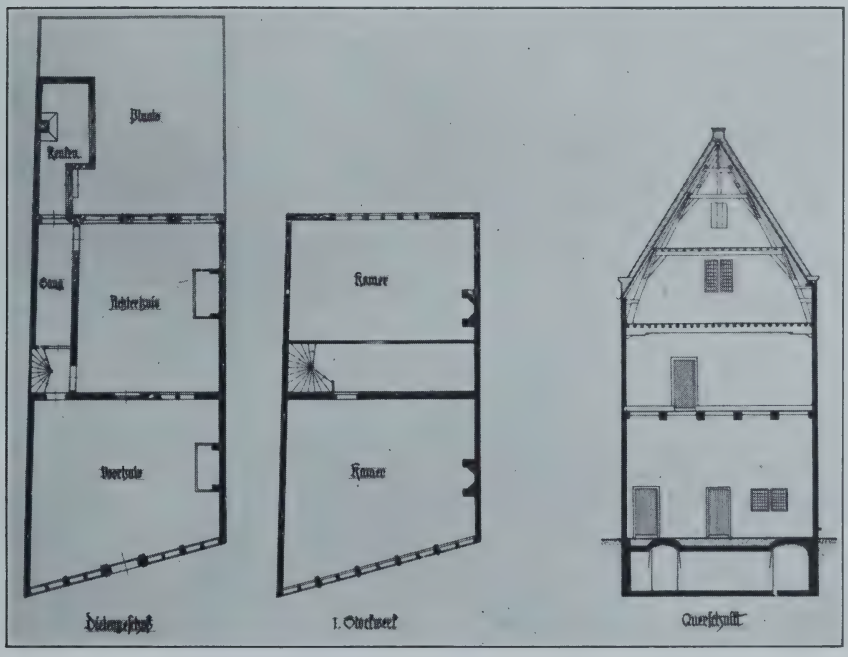


Abb. 2 Abb. 3 Abb. 4

(vgl. Abb. 4 und 6). Auffallend erscheinen die geringen Holzstärken bei den niederländischen Dächern gegenüber den im Osten üblichen stark bemessenen Konstruktionsteilen. Bemerkenswert ist die Entwässerung der Dachfläche durch ursprünglich vorgelegte hölzerne Rinnen, wie wir sie heute noch in Holland vielfach antreffen. Diese Anordnung war hier möglich infolge der bestehenden schmalen Traufgänge, die vielleicht zu einer Zeit, in der die Danziger Häuser sich noch nicht unmittelbar aneinander schlossen, auch hier bestanden haben mögen. Die willkürliche Durchbrechung älterer Giebelfüße, wie z. B. an den Häusern Heilige-Geist-Gasse 79, Brotbänkengasse 11, sowie Langgasse 37 und 38, lassen mit Sicherheit annehmen, daß die ursprünglich ebenfalls vorgehängte Rinne später auf die Dachsparren aufgelegt, durch Höherführung der Brandmauern begrenzt und so als

Stockrinne ausgebildet wurde. Für die Gestaltung des Giebelfußes wird diese in späterer Zeit überall durchgeführte Art der Wasserabführung charakteristisch. Die Rinnen endigten anfänglich in Wasserspeier, die durch in die Giebelarchitektur eingepaßte, bogenförmig geschlossene Öffnungen hindurchragten. Abfallrohre an den Danziger Häusern sind erst im 18. Jahrhundert allgemein ausgeführt worden. Die ortsübliche Dachdeckungsart mit holländischen Pfannen ist sicherlich auf niederländischen Einfluß zurückzuführen.

Als Baumaterial für das Konstruktionsgerüst der Wände des Hauses ist mit wenigen Ausnahmen im frühen Mittelalter Holz verwendet worden. In dem Danziger Erbbuch vom Jahre 1382 sind nur wenige Häuser als Massivbauten bezeichnet, und erst um die Mitte des 15. Jahrhunderts wird dem Bau von Holzhäusern durch Verordnungen entgegengearbeitet. Nur wenige Reste sind erhalten. Auch in den niederländischen Städten stehen nur noch ganz vereinzelt vollständig aus Holz gezimmerte Bürgerhäuser. Bei ihnen ist das Holzgerüst statt der beim niedersächsischen Fachwerkbau üblichen Auskleidung der einzelnen Felder mit Lehmstaakung oder später mit Ziegeln durch Bretter verschalt, die nur Tür- und Fensteröffnungen frei lassen. Der beim deutschen Fachwerkbau so reizvolle Wechsel von sichtbaren Holzteilen und dem andersartigen Füllmaterial der Gefache fällt also fort. Die einzige Belebung der glatten Wände dieser übrigens auch in Belgien und Nordfrankreich nachweisbaren Holzhäuser bilden zuweilen große konsolartige Streben, die die vorgekragten Balken der einzelnen Geschosse stützen. Das ebenfalls verschalte Giebeldreieck verläuft in der Dachschräge gradlinig und ist häufig mit einer zweiten kleeblattförmig ausgeschnittenen Bretterlage als dekorativer Schmuck versehen. Bemerkt sei übrigens, daß in gotischer Zeit für den Massivbau dies Motiv nicht nur in den Niederlanden, sondern auch in Danzig, hier am Hause Frauengasse 12, dem Holzbau entlehnt wurde. Zu einer Zeit, in der in deutschen Landen der Fachwerkbau kaum noch für das Wohnhaus in Frage kam, hält man in den Niederlanden am hölzernen Ständerbau fest, und zwar für das hohe Dielengeschoß im Gegensatz zu den Danziger Häusern, deren Frontmauern vom späten Mittelalter ab durchweg massiv hergestellt wurden. Ein Vergleich der beiden, in den Abbildungen 7 und 8 dargestellten, aus dem Anfang des 17. Jahrhunderts stammenden Häuser läßt diesen charakteristischen Unterschied deutlich erkennen. Wenn auch zur Zeit in den Niederlanden nur noch wenige Häuser in dieser ursprünglichen Fassung vorhanden sind, so zeigen doch alte Kupferstiche und Gemälde von Stadtansichten, daß diese Ausbildung der Fassaden allgemein üblich war. Der Holzbau wurde für das Dielengeschoß beibehalten, während die übrigen Geschosse und der Giebel massiv ausgeführt wurden (vgl. Abb. 1). Das tiefe Dielengeschoß so gut wie irgend möglich zu beleuchten, die Frontwand also in ganzer Höhe zu durchbrechen war sicherlich der Grund für das Festhalten an der Holzkonstruktion, denn die geringen Abmessungen der Ständer waren für die Lichtzuführung günstiger als die notwendigerweise stärkeren Steinpfeiler. So erscheint das ganze Dielengeschoß gleichsam aufgelöst in eine einzige Fensterfläche, geteilt durch das vertikale Ständersystem und durch eine wagerechte Verriegelung in Höhe des Türsturzes. Den oberen Abschluß und das Auflager für die sich darüber erhebende massive Frontmauer bildet ein starker Balken, der über die Flucht der

Holzständer heraustritt und oftmals durch reich geschnitzte Kopfbänder gestützt wird. In solchen Fällen ist dann die wagerechte Holzschwelle als Architrav und Fries gegliedert, während das die antike Gebälkform ergänzende Kranzgesims bereits in Stein hergestellt wird. Ein Beispiel für diese Gestaltung der Giebelwand ist das auf Abbildung 7 dargestellte Häuschen in Enkhuizen. Da die Notwendigkeit, das Untergeschoß möglichst hell zu beleuchten, in jedem Falle vorteil-

Schema eines Danziger Bürgerhauses

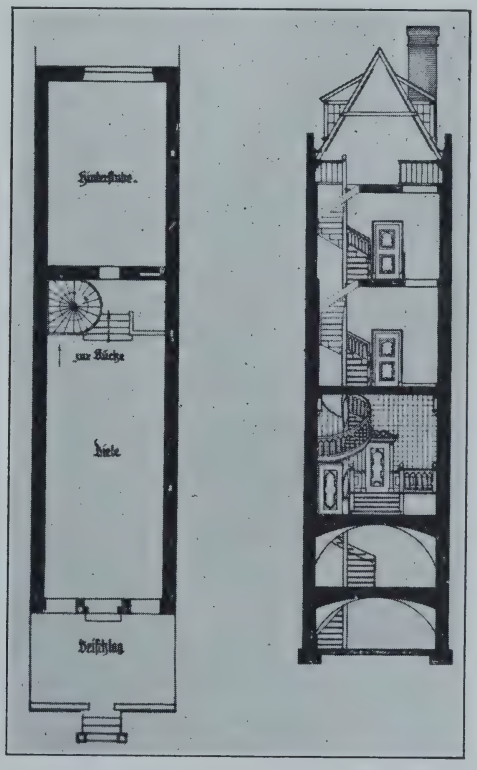


Abb. 5 Abb. 6

haft erschien, findet sich diese Holzständerkonstruktion nicht nur bei kleinen Häusern niederländischer Küstenstädte, sondern auch bei großen Geschäftgebäuden, in denen die Diele Kontorraum war oder zur Auslage von Waren diente. Erst im 18. und 19. Jahrhundert wurden die Holzständer durch gemauerte Pfeiler ersetzt. In Danzig war diese massive Konstruktion der Tragepfeiler von Anfang an üblich. Aber auch hier mußte bei gleichartiger Grundrißgestaltung das Bestreben vorhanden sein, die Fenster so hoch und so breit wie irgend möglich zu machen, was übrigens auch für die Obergeschosse galt. Die Rekonstruktion des Hauses

Pfefferstadt 44 in Danzig, Abbildung 8, möge als Beweis dafür dienen. Im Mittelalter sind die massiven Teile der Frontmauern durchweg in unverputztem Backstein ausgeführt worden, für dessen Verarbeitung in den Niederlanden ein vorzügliches Rohmaterial zur Verfügung stand. Die landesüblichen kleinformatigen Ziegel von nahezu gleichmäßiger braunroter Färbung, in sorgfältigster Weise vermauert, geben den Bauten einen zierlichen Maßstab und verleihen ihnen auch in ihrer äußeren Erscheinung die sprichwörtliche Sauberkeit und Gepflegtheit der inneren Ausgestaltung des niederländischen Hauses. Aus gröberem Stoff geformt sind die frühen Danziger Backsteinhäuser, für die zum Teil noch die im Kirchenbau üblichen klosterformatigen Ziegel Verwendung fanden. Die in der Farbe ungleichmäßigen und an der Oberfläche rauhen Backsteinwände überzog man mit einer dünnen Putzschicht, die rot gestrichen und mit aufgemalter Fugenteilung versehen wurde. Erst in der Renaissancezeit, als die wirtschaftlichen Beziehungen zu den holländischen und belgischen Handelsplätzen inniger wurden und dorther stammende Handwerker in Danzig tätig waren, zeigt sich auch hier eine kultiviertere Behandlung der Hausfassaden, die zum Teil in reicherer Formgebung erscheinen als ihre Vorbilder. Das trifft besonders für die Durchbildung der Giebel zu. Der mittelalterliche Staffelgiebel mit seiner gleichmäßigen Abtreppung ist für das niederländische Haus bis tief in das 17. Jahrhundert hinein charakteristisch. Er tritt in Städten wie Haarlem, Groningen, Dordrecht, Hoorn oder Enkhuizen, um nur einige Orte zu nennen, in verschiedenen Abwandlungen auf, besonders was die auf einem vorgekragten Pfeilerchen stehenden Giebelbekrönungen betrifft, so daß man von einem ortsüblichen Giebeltypus der einzelnenen Städte sprechen kann. Dadurch gewannen die Straßenwandungen einen hohen Grad von Geschlossenheit und Einheitlichkeit der Gesamtwirkung, der in Danzig nicht erreicht wird. Hier, wo die Formensprache der Renaissance nicht allein von Holland, sondern auch von Süddeutschland her beeinflußt wird, treten schon bei Bauten aus der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts Giebel mit reich geschwungenen Umrißlinien auf. In der formalen Giebelgestaltung prägt sich jede Stilwandlung aus, so daß größte Verschiedenheit herrscht. Die Ausbildung der Frontwände zeigt deutlicher die Abhängigkeit von den Niederlanden. Hier wie dort die Durchsetzung des Backsteinwerks mit einem Werkstein, der in den westlichen Teilen Hollands aus Bentheim bezogen wurde und in Danzig als „Bentmerstein" urkundlich vielfach Verwendung fand. Die Betonung der Geschosse durch Gurtgesimse stellt hier wie dort die übliche wagerechte Teilung der Fassaden dar. Über den breiten Fenstern erscheinen die erforderlichen Entlastungsbögen, die entweder in der Mauerfläche liegen oder plastisch hervortreten, gestützt auf kleine Werksteinkonsolen oder auf Pfeiler, die durch die ganze Geschoßhöhe reichen. Die in den Niederlanden auch bei Massivbauten häufig anzutreffende Überkragung der einzelnen Geschosse mag als letzter Anklang an die ehemalige Holzkonstruktion gedeutet werden. Konsolbildungen aus Holz, wie z. B. am Rathaus in Haarlem, zeugen von der Wertschätzung, die man für weit ausladende Konstruktionsteile diesem Material auch bei Steinfassaden zuteil werden ließ. Gleicherweise aus Holz hergestellt sind die reich skulpierten Konsolen unter den Erkern der Mottlaufront des Hauses der Naturforschenden Gesellschaft in Danzig, ein Bau, der dem Niederländer Antony van Obbergen zugeschrieben wird.

Danzig, Pfefferstadt 44

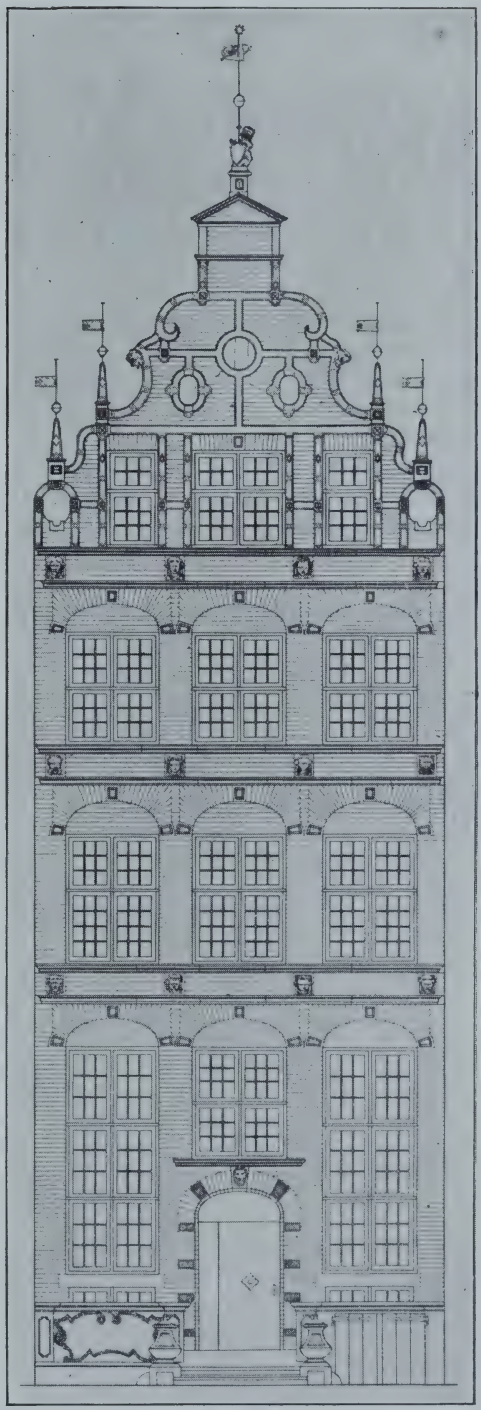


Abb. 8

Enkhuizen (Holland)
an der Breedstraat

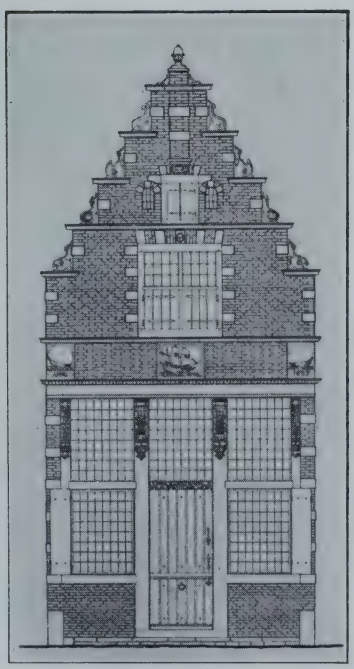


Abb. 7

Zusammenhänge zwischen Ost und West lassen sich auch bei den Beischlägen feststellen, jenen offenen, die ganze Hausbreite einnehmenden Vorplätzen, die in einigen niederdeutschen Städten, besonders aber in Danzig, den Straßenzügen ein besonderes Gepräge geben. Dem Bedürfnis, vor dem Hause nach der Straße zu eine Sitzgelegenheit zu schaffen, begegnen wir auch in den Niederlanden. Zunächst geschah das hier in einfachster Weise so, daß auf dem gegen den Bürgersteig nur wenig gehobenem Vorplatz senkrecht zur Frontwand zwei Holzbänke an den Hausgrenzen aufgestellt wurden (vgl. Abb. 7). Bei späterer Herstellung in Stein an größeren Bauten erhielten besonders die Wangen dieser Bänke eine reichere Ausbildung. Derartige sogenannte Wangelsteine sind als vorderer Abschluß der Sitzgelegenheit auch in Danzig nachweisbar. Hier hat der Beischlag eine weitergehende Entwicklung erfahren als in den Niederlanden. Die zuweilen doppelt unterkellerten Dielengeschosse wurden zum Schutz gegen Überschwemmungsgefahr besonders in den unteren Teilen der Stadt erheblich aus dem Gelände herausgehoben. Mitbestimmend hierfür war sicher auch die Absicht, die Kellerräume von der Straße aus leichter zugänglich zu machen. Die in gleicher Höhe mit dem Dielengeschoß liegenden Beischlagflächen bedurften also einer Treppe, um auf ihre Höhe zu gelangen und eines Brüstungsgeländers gegen die tiefer liegende Straße. Zunächst wurden diese Beischläge aus Holz hergestellt und vielfach zur Nutzbarmachung für verschiedene Zwecke überbaut. Vom Anfang des 17. Jahrhunderts ab erfolgte ihre Ausführung in Werkstein mit reichem bildhauerischem Schmuck an den Brüstungsplatten, die selten durch reiches Schmiedewerk ersetzt wurden. Bleibt in den Niederlanden der Beischlag ohne erhebliche Wirkung auf die Gesamterscheinung des Hauses, so wird diese in Danzig durch die reich gegliederte, in den Straßenquerschnitt übergreifende Sockelbildung wesentlich beeinflußt.

Die engen Beziehungen, die Danzig auf politischem und kommerziellem Gebiet vom Mittelalter an während der Hansazeit und später mit den Niederlanden verbanden, wirken sich also, wie wir gesehen haben, auch in der Wohnweise und in der formalen Gestaltung der Behausungen ihrer Bürger aus.

Das Indogermanische Haus Europas

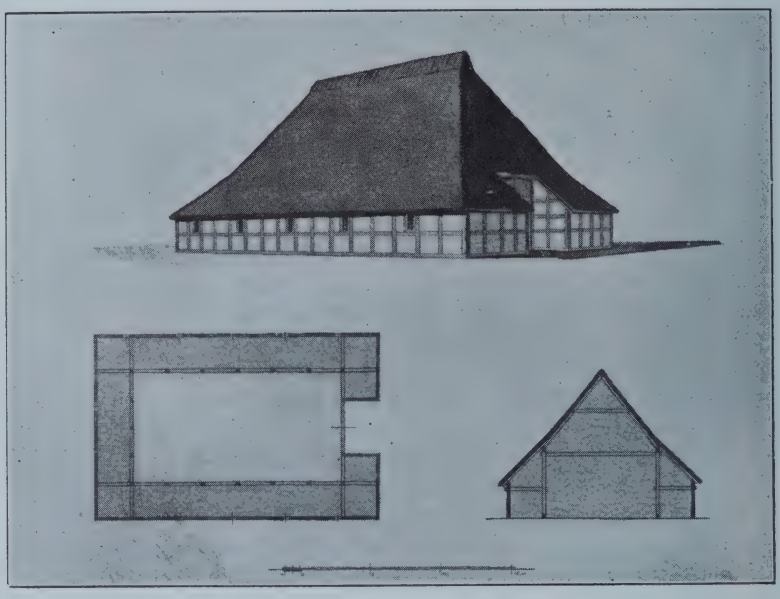
Von Prof. Otto Kloeppel

„Das ist's ja, was den Menschen zieret,
Und dazu ward ihm der Verstand,
Daß er im innern Herzen spüret,
Was er erschafft mit seiner Hand."

Dieses Dichterwort läßt uns einen Blick in die metaphysische Geheimkammer des Menschen werfen und weist uns zu den tiefsten Quellen seines wahren Lebensglückes, der Freude an seinem Werke um des Werkes willen. Und wenn wir bei allen Völkern die gleiche Sage finden von einem weit zurückliegenden goldenen Zeitalter, so können wir nach unseren heutigen Erfahrungen ein solches nur in der Richtung deuten, daß es sich dabei stets um jene Entwicklungsperiode des Menschen handelt, wo dieser sich noch alles, was er zum Leben brauchte, mit eigener Hand allein schuf, und selbst das kleinste Gerät nicht nur konstruierte, sondern zugleich auch gestaltete, das heißt, es so schön formte, wie es ihm nur immer möglich war. Denn diese ideale Vergangenheit steht im schärfsten Gegensatz zu unserem Heute, wo die meisten Menschen zu kleinsten Gliedern einer endlosen Produktionskette geworden sind, deren Anfang und Ende sie nicht mehr zu überschauen vermögen, wodurch ihnen mit dem Stückwerk ihrer Lebensbetätigung auch das alte einheitliche Welt- und Volksbewußtsein in Stücke gegangen ist.

In diesem einstigen goldenen Zeitalter liegen nun die Anfänge aller Kultur, damals wurden die Urformen für die lebenswichtigsten Dinge geschaffen, deren erste Gestaltung solange durch alle Weiterbildungen durchschimmern wird, als überhaupt ein ungebrochener Entwicklungszug zu verfolgen ist. Zu diesen lebenswichtigsten Dingen gehörte aber vor allem auch das Haus, das schützende Dach und Fach für den Menschen selbst, sein Vieh und seine Vorräte. In der Ausgestaltung ihres ursprünglichen bäuerlichen Anwesens ist jede Kultur am selbständigsten und bleibt es am längsten. Wollen wir uns daher über älteste Zusammenhänge in solchen Dingen klar werden, so müssen wir zu ihren ersten Quellen vordringen. Tun wir das aber klaren Auges für unsere europäische Heimat, so lassen sich hier uralte innere Kulturverbundenheiten mit ganz überraschenden Wechselwirkungen feststellen.

Innerhalb Europas besteht seit alters ein deutlicher Unterschied zwischen den südlicheren wärmeren, sich längs des Mittelländischen Meeres erstreckenden Teilen und seinen nordalpinen Gebieten. In letzteren haben wir dem heutigen Stande der Forschung nach die Wiege des Indogermanentums zu suchen, während die mittelländischen Randgebiete zunächst eine uralte eigene, andersgeartete Kultur aufzuweisen hatten. Später aber sind sie von Norden aus indogermanisiert worden.

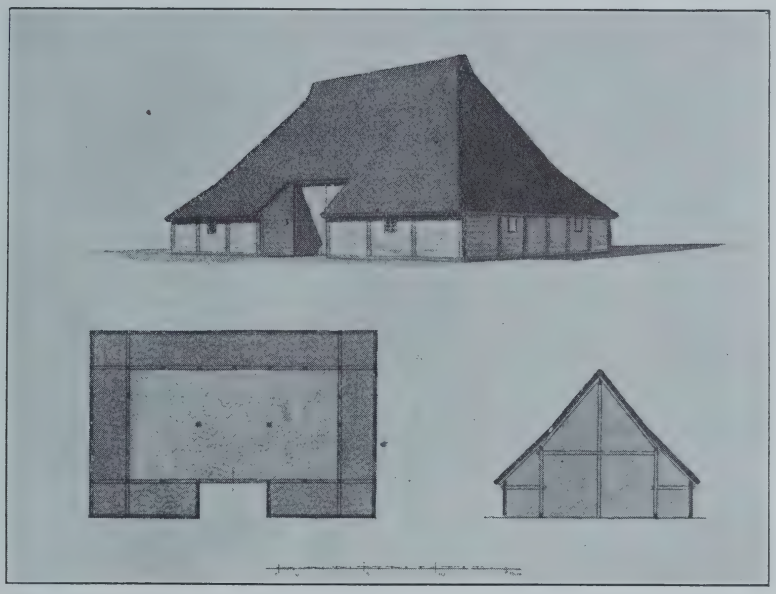


Urtyp des niederdeutschen Einhauses

Abb. 1

Und zwar handelt es sich dabei wohl um zwei große Einflußwellen, einmal die Donau entlang bis Griechenland hinein und dann über die Alpen hinweg, die apenninische Halbinsel erfassend.

Aber diese beiden Wellen waren nicht ganz gleicher Wesensart, es muß in alten Zeiten auch einmal eine das nordalpine indogermanische Europa in eine westliche und östliche Kulturgruppe scheidende Trennungslinie vorhanden gewesen sein. Sie mag ursprünglich stark geschwankt haben, um sich später in der Richtung von der Gegend Wien, Preßburg aus bis nach Stettin deutlicher zu markieren. Diese Linie bedeutet nämlich von Preßburg bis zu den Sudeten ein Stück der alten Nordostgrenze des Keltentums und von den Sudeten ab der Görlitzer Neiße und dem Unterlauf der Oder folgend die alte Grenzscheide zwischen Ost- und Westgermanen. Östlich unserer nord-südlichen Trennungslinie haben wir es also mit dem ursprünglichen Haupteinflußgebiet der Ostgermanen und Slawen und westlich davon mit dem der Westgermanen und Kelten zu tun. Auf kulturellem Gebiete scheinen nun zwischen den Ost- und Westgermanen frühzeitig stärkere Gegensätze bestanden zu haben, die sich im besonderen auch auf dem uns hier beschäftigenden Gebiete der Gestaltung des bäuerlichen Anwesens zeigen. Hier hat jede dieser beiden Stammesgruppen ihre besondere Eigenart entwickelt, wobei wir feststellen können, daß das ostgermanische Haus von stärkstem Einfluß auf das slawische gewesen ist, während das westgermanische eine nähere Verwandtschaft mit dem der Kelten zu zeigen scheint,

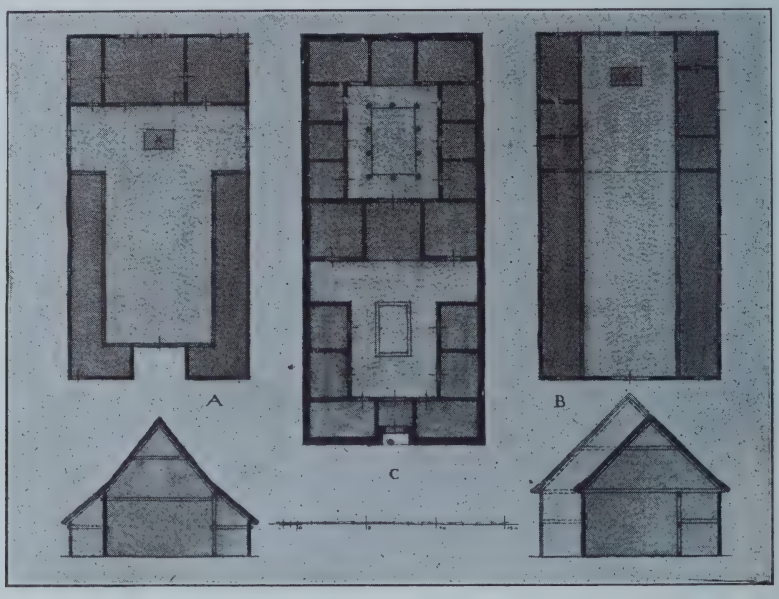


Urtyp des oberdeutschen Einhauses

Abb. 2

wobei anfangs die letzteren die gebenden gewesen sein könnten. Auf jeden Fall haben wir im nordalpinen Europa schon für die Urhausgestaltung eine westliche und östliche Gruppe zu unterscheiden, die von vornherein im stärksten Gegensatz zueinander stehen und deren Unterschiede noch bis zu den Bauten der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts deutlich nachgewirkt haben.

Nun sind die denkbar verschiedensten Arten, ein bäuerliches Anwesen zu gestalten, folgende: Einmal errichtet man für jedes einzelne Sonderbedürfnis auch ein besonders entsprechend dimensioniertes Haus — Vielhaus-System —, oder man bringt alles, Menschen, Vieh, Vorräte mit sämtlichem Zubehör, in einen einzigen großen Bau unter — Einhaus-System —. Natürlich können diese beiden anfangs absolut gegensätzlichen Systeme bei fortschreitender wirtschaftlicher wie kultureller Entwicklung allmählich an starrer Einseitigkeit verlieren. Neben das zunächst einzige Haus treten allmählich einzelne andere und ebenso wachsen bei anfänglich unbeschränkter Vielheit Häuser verwandter Verwendungsart mit der Zeit zusammen, so daß, wenn wir heute einen von vier Gebäuden umbauten Hof vielfach als eine Art Norm finden, es nicht so ohne weiteres festzustellen sein wird, wo der Ausgangspunkt für ein solches Endglied gelegen haben mag, beim Einhaus- oder Vielhaus-System. Ersteres ist nun offenbar anfänglich typisch für unser West- und letzteres für unser Ostgebiet. Dabei haben sich den Urformen nächststehende Bildungen überall da am besten erhalten, wo sich die wirtschaftlichen Verhältnisse und sonstigen Lebensbedingungen am wenigsten veränderten,



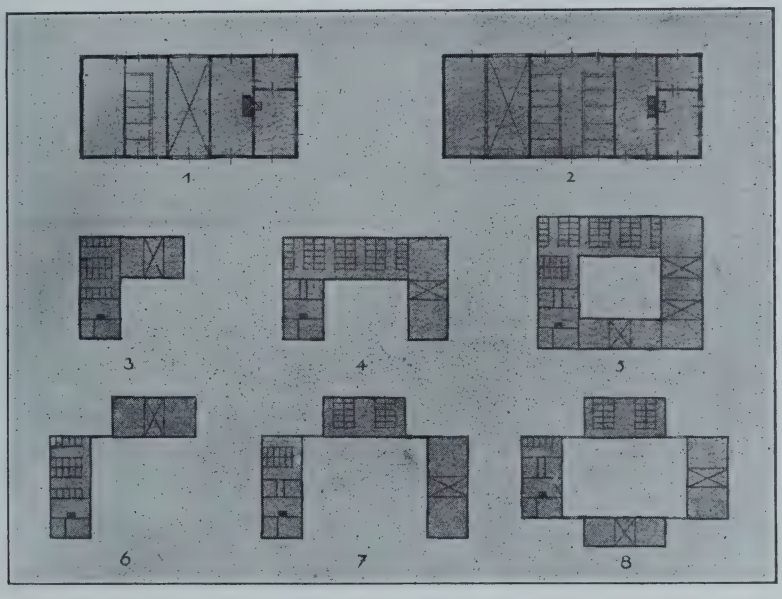
A u. B Niederdeutsche Typen. C das pompejanische Haus

Abb. 3

so in zurückgezogenen Gegenden oder sonstigen stillen Winkeln, während die fortschreitende Entwicklung der Landwirtschaft in fruchtbaren Ebenen usw. die weitestgehenden Abweichungen vom ursprünglichen Zustande zeitigte.

Das reine Einheitshaus ist uns nun in zwei Abwandlungen überliefert, einmal aufgeschlossen aus der Längsachse und das andere Mal aus der Querachse. Dieser Unterschied hängt mit den beiden möglichen Konstruktionsarten zusammen. Die eine, das Kehlbalkendach, läßt die Mittelachse der Längsrichtung frei, während die andere, das Pfettendach, sie mit einer Ständerreihe zur Unterstützung der Firstpfette besetzen muß. Letztere Konstruktionsart ist in Oberdeutschland und Frankreich zu Hause, darum herrscht hier das Querachsenhaus gegenüber dem Kehlbalkendach und Längsachsenhause Niederdeutschlands.

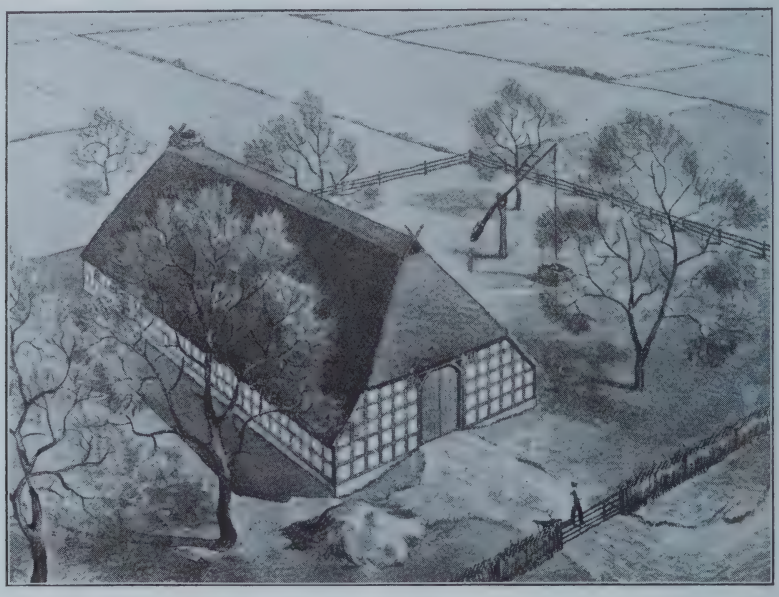
Dem großen Einheitshause, daß das gesamte Anwesen des Menschen aufnimmt, ist nun sicher ein nur für den letzteren allein bestimmtes Haus vorangegangen, als man das Vieh noch im Freien ließ und die Vorräte vielleicht in Gruben barg. Dieses Unterkunftshaus des Menschen und seines persönlichen Anhanges scheint nun überall die gleiche Art der Nutzung gehabt zu haben, in der Mitte oder längs dieser das lodernde Feuer und ringsherum nach den Wänden zu die Lager- und Schlafplätze der Insassen. Als dieses Haus dann auch noch das Vieh und die Vorräte aufnehmen sollte, mußte es entsprechend vergrößert werden, die grundsätzliche Anordnung blieb aber zunächst die gleiche, nur mußte der Mittelraum jetzt die Höhe des beladenen Erntewagens erhalten. Abbildung 1



Entwicklung des oberdeutschen Bauernhofs

Abb. 4

und 2 zeigen das Längsachsen- wie Querachsen-Einheitshaus in ihren ersten Formen, die in Anlage wie Aufbau ganz wesentlich übereinstimmen. Sie haben beide vollständiges Walmdach und jedesmal wird das hohe Einfahrtstor in die Baumasse bis zum Ständerwerk der inneren hohen Halle eingeschnitten, wobei die in den Grundrissen hell gehaltene Halle allseitig von einer niedrigen Abseite umschlossen ist, die nur beim Zufahrtstor wegfällt. Doch in der weiten inneren Aufteilung ergeben sich durch die Längs- und Queraufteilung dann sehr charakteristische Unterschiede. Beim Längshause behalten die Abseiten ihre alte Bedeutung, nur daß sich jetzt Mensch und Vieh darin teilen, im vorderen Abschnitt dienen sie als Stände für letzteres, und weiter hinten, um die nach dort verrückte Feuerstelle, bilden sie nach wie vor die Schlafstätten der Menschen. Dann aber differenziert sich das Wohnbedürfnis (Abbildung 3 A), man nimmt rechts und links von der Feuerstätte einen Ständer der Hauptkonstruktion fort, indem man den auf ihm ruhenden Rahmen verdoppelt, und erhält so das typische, an die Diele kreuzarmförmig angeschlossene Fleet als Aufenthaltsraum für den Menschen, und hinter diesem schließt man im sogenannten Kammerfach dann größere Einzelwohnräume an. Damit verschwinden die Abseiten an den Giebeln allmählich ganz und an Stelle des Vollwalms tritt der Krüppelwalm, später sogar häufig eine stolze Giebelbildung. Die Vorräte werden dabei hauptsächlich im Dachboden untergebracht. Daneben findet sich dann noch eine andere charakteristische Grundrißform (Abbildung 3 B), bei der keine Verbreiterung des Fleets stattfindet, als

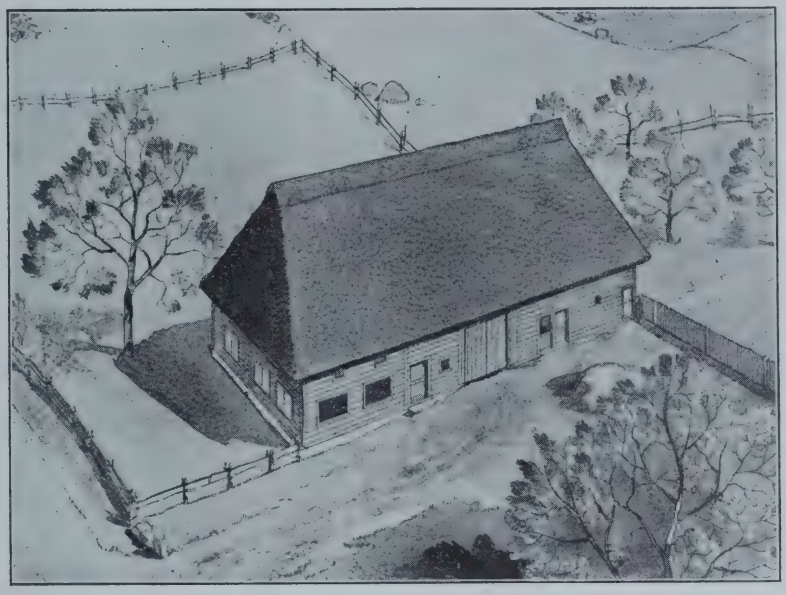


Niederdeutsches Einhaus

Abb. 5

solches dient allein der hintere Teil der gleichmäßig das ganze Haus durchlaufenden Mittelhalle, die Abseiten verbreitern sich, werden zum Teil auch zweigeschossig und nehmen seitwärts des Fleets besondere Wohnräume auf. In beiden Fällen kann bei einfacheren Verhältnissen die Abseite an der einen Seite in Wegfall kommen. Ganz anders gestaltet sich die Einteilung des aus der Querachse aufgeschlossenen Hauses (Abbildung 4, 1), wenn es außer den Menschen auch noch Vieh und Vorräte aufnehmen soll. Letztere kommen wieder in den Dachboden, der von der Tenne aus beschickt wird, und da diese hier die ganze Quertiefe des Hauses einnimmt, wird der Mensch auf der einen und das Vieh auf der anderen Seite davon untergebracht. Um beides in praktischer Weise durchführen zu können, verlieren die die hohe Mittelhalle umgebenden schmalen Raumteile hier bald ihre alte Bedeutung, das Vieh wird in Querreihung aufgestellt und vom Wohnteil spaltet sich eine die ganze Tiefe des Hauses einnehmende Küche ab und neben ihr wird giebelseitig eine Stube nebst Kammer angeordnet. Dies ist die typische Gestaltung des Wohnteiles des oberdeutschen (zugleich mitteldeutschen) Hauses, wie sie allenthalben in den westlichen Stammlanden gleich wie dem östlichen Kolonisationsgebiet festzustellen ist. Ganz ähnlich geht auch die Entwicklung in Frankreich vor sich.

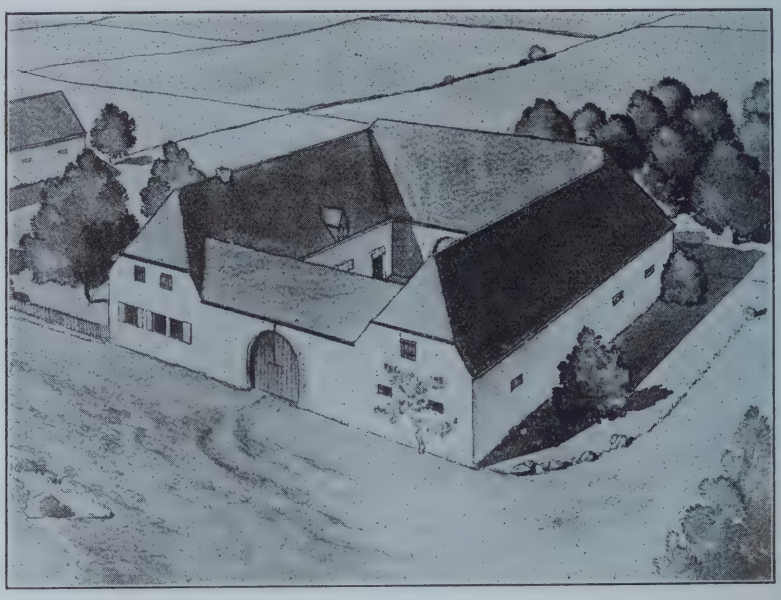
Diese Urtypen des aus der Quer- oder Längsachse aufgeschlossenen Einheitshauses erfahren nun mit fortschreitenden wirtschaftlichen Verhältnissen eine entsprechende Weiterbildung, bedingt durch immer stärkeren Raumbedarf des Wirt-



Oberdeutsches Einhaus

Abb. 6

schaftsteiles. Letzterer war beim quergeteilten Hause ohne Schwierigkeiten durch einfache Verlängerung desselben zu befriedigen, da ja der geschlossene Giebel der Stallseite eine solche ohne Schwierigkeiten zuläßt. Nach beliebiger Vergrößerung des Stalles konnte man hier eine zweite Tenne mit Bansenraum daneben anordnen und so weitestgehenden Raumanforderungen gerecht werden. Die alte Tenne zwischen Wohnung und Stall wurde damit aber eigentlich überflüssig und verschwindet dann auch, aus dem ursprünglichen Mitteltennbau wird ein Mittelstallbau (Abbildung 4, 1 und 2). Bei größeren Verhältnissen erhält eine solche Anlage dann nur eine unpraktische Länge, darum wird sie einmal oder auch zweimal abgeknickt und schließlich entsteht ein vollständig karreeförmig umbauter Hof, der zwischen den Giebeln seiner Seitenflügel nach der Straße zu durch einen Schuppen mit überdeckter Durchfahrt zum Innenhof abgeschlossen wird (Abbildung 4, 3—5 und Abbildung 7). Dabei hält man gerne die alte Reihenfolge im Zuge der Gebäude, Wohnteil, Stall, Scheune, fest; um eine Durchfahrt nach hinten zu erhalten, ordnet man aber auch oft genug die Scheune rückwärts an, wobei eine Trennung des Stallraumes eintritt, da ein Teil desselben fast immer seinen unmittelbaren Zusammenhang mit dem Wohnflügel behält. Dieser strengen Geschlossenheit der Hofbildung stehen nun auch Zerfallserscheinungen gegenüber, die aber immer einer etwas späteren Entwicklung angehören, doch auch hier bleibt stets der wichtigste Stallteil gern in Verbindung mit der Wohnung (Abbildung 4, 6—8 und Abbildung 8). Geschlossener wie offener Hofbau findet sich in dieser Art überall,

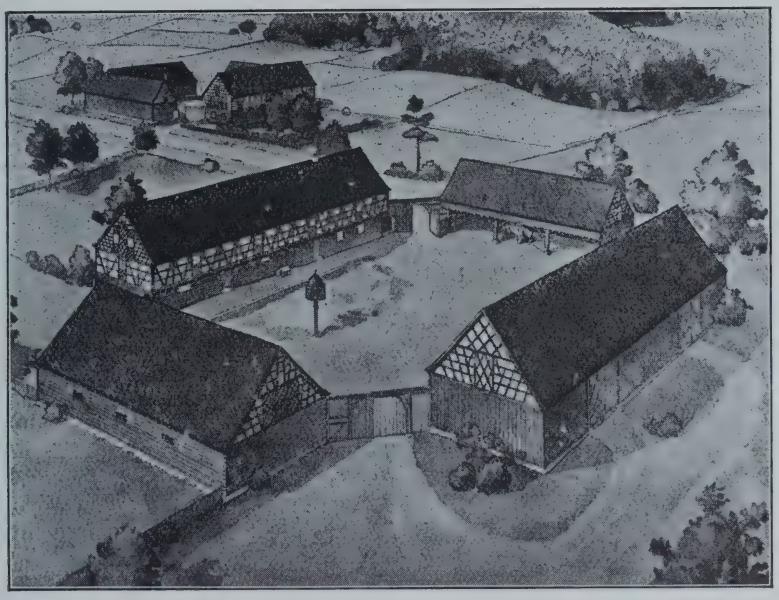


Oberdeutscher Karreehof, geschlossen
Österreich

Abb. 7

wo das quergeteilte Ober- (wie mitteldeutsche) Einhaus den Ausgangspunkt gebildet hat, sowohl innerhalb der westlichen Stammlande, wie des zugehörigen östlichen Kolonisationsgebietes. Hierbei ist aber deutlich zu verfolgen, wie in landwirtschaftlich begünstigten Gegenden die allmähliche Trennung der Gebäude überwiegt, während unter bescheideneren Verhältnissen stärker an ihrem Zusammenhange festgehalten wird.

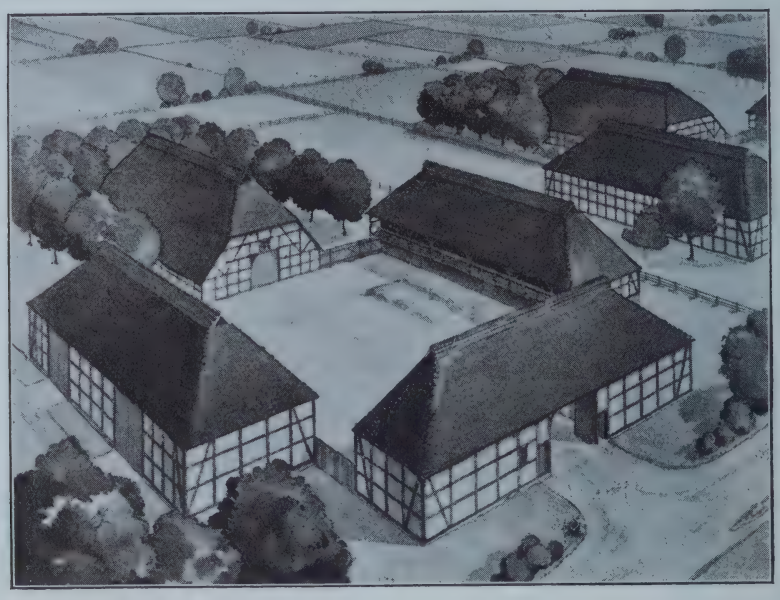
Mit der aus der Längsachse aufgeschlossenen Einhaus-Anlage Niederdeutschlands verträgt sich eine Raumvermehrung durch einfache Verlängerung sehr viel schlechter, da bei diesem keine tote Hausfront für eine solche zur Verfügung steht; man mußte darum hier von vornherein zur Errichtung weiterer getrennt angeordneter Gebäude übergehen. So findet sich schon im altsächsischen Gebiet bei fortschreitender landwirtschaftlicher Entwicklung sehr früh eine besondere Scheune und auch das eine oder andere selbständige kleinere Nebengebäude. Aber am großen Haupthause, in dem auch immer die Stallungen untergebracht sind, wird hier stets festgehalten. Anders im zugehörigen östlichen Kolonisationsgebiet, das sich als erst sehr breiter und dann immer schmäler werdender Küstenstreifen geschlossen bis in die Gegend von Stolp in Hinterpommern erstreckt und dann im Weichsel-Nogat-Delta und der preußischen Küste noch eine Fortsetzung hat. Hier entwickelt sich außer einer besonderen Scheune auch noch ein besonderes großes selbständiges Stallgebäude, und das Vieh wird allmählich ganz aus dem alten



Oberdeutscher Karreehof, offen
Egerland

Abb. 8

Einheitshause herausgenommen. Dann tritt auch noch ein Schuppen hinzu, und so entsteht schließlich eine sehr stattliche, meist auch sehr regelmäßige, von vier selbständigen Gebäuden umschlossene Hofanlage, die sich aber von der aus oberdeutscher Wurzel entsprossenen immer ganz deutlich durch die Stellung des Wohngebäudes (hier gleich Rest des alten Einheitshauses) unterscheidet. Beim oberdeutschen Hof (geschlossen oder offen) steht das Hauptgebäude mit dem Giebel des Wohnteiles immer nach der Straße zu und der Hof liegt seitlich neben ihm. Abweichungen von dieser Normalanordnung sind äußerst selten. Auch das niederdeutsche Einheitshaus ist in der Regel der Tiefe nach angeordnet und wendet der Straße eine Giebelseite zu, und zwar kann dies einmal der Giebel mit dem großen Einfahrtstor sein und dann wieder der andere, nach dem zu die Wohnräume liegen. Im ersten Falle rückt das Haus etwas von der Straße zurück und es befindet sich immer eine Art Hofstätte (für den Misthaufen usw.) vor ihm, im zweiten Falle rückt das Haus dichter an die Straße heran und jede Hofbildung entwickelt sich hinter ihm. Ganz entsprechend geht nun auch die volle, schließlich von vier Gebäuden umgebene Hofentwicklung vor sich, einmal steht das Hauptgebäude vorn, einmal hinten, je nachdem an welchem Giebel das große Einfahrtstor angeordnet ist. Niemals aber steht hier das Wohnhaus ausgesprochen seitlich der Hofanlage. So haben wir im niederdeutschen Kolonisationsgebiet zwei typische Hofformen: die eine ist von der Altmark bis in die Stolper Gegend zu

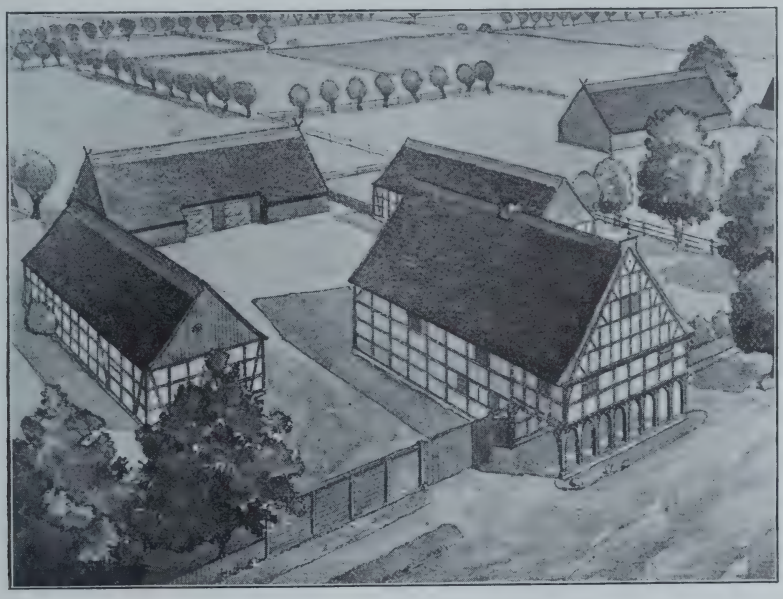


Niederdeutsche Hofbildung, Pommern

Abb. 9

verfolgen, hier liegt bei voller Entwicklung an der Straßenseite ein längeres als Schuppen dienendes Gebäude mit meist mittlerem Einfahrtstor, seitlich sind Scheune und Stall angeordnet und im Hintergrunde ragt uns der große Einfahrtsgiebel des alten Einhauses entgegen (Abbildung 9), bei der zweiten Hofart liegt das Hauptgebäude mit dem Wohnteil nach der Straße zu, die Hinterseite bildet die breite Scheune mit Quertennen, rechts und links befinden sich Ställe und Schuppen, während die Einfahrt in den Hof seitlich des Hauptgebäudes erfolgt (Abbildung 10).

Nun ist es klar, daß mit dem Augenblicke, wo bei solchen Anlagen das Vieh aus dem alten Einheitshaus ganz verschwunden und in besonderer Stallung untergebracht ist, sowie in der selbständigen Scheune jetzt besondere Dreschdielen vorhanden sind, dieses alte Einheitshaus in seiner ursprünglichen Anordnung ganz überflüssig und abständig erscheinen mußte. Man hat es dann auch allmählich umgestaltet und dabei der Tatsache Rechnung getragen, daß es ja jetzt in der Hauptsache nur noch Wohnzwecken zu dienen brauchte. Dieser Vorgang läßt sich in Hinterpommern wie dem Weichsel-Nogat-Delta deutlich verfolgen, nur spielt er sich in beiden Gebieten etwas verschieden ab. In Pommern wird das alte Haupthaus zunächst immer kürzer, bis es schließlich breiter als tief geworden und man dann auch das Dach entsprechend parallel der Hoffront anordnete. Dabei hält man zunächst noch an dem großen Einfahrtstore fest und das jetzige Breitenhaus wird damit zwei- oder wenigstens anderthalbgeschossig; dann gibt

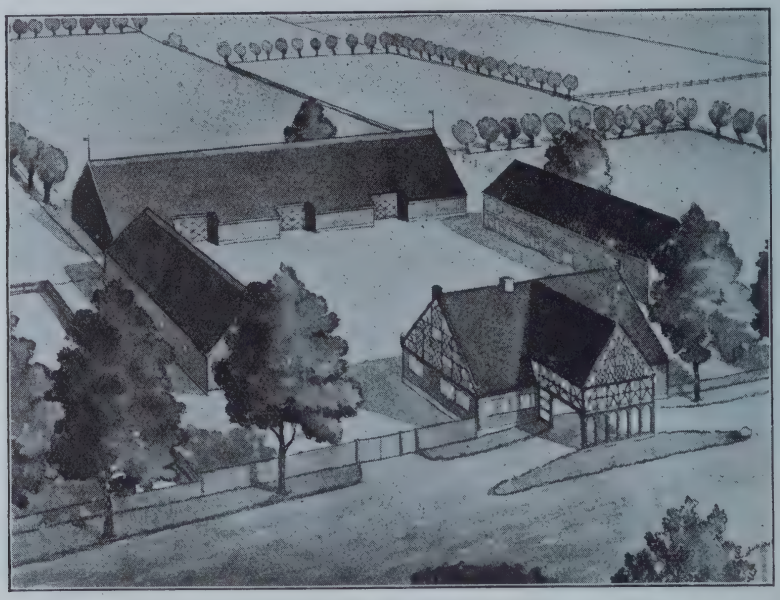


Niederdeutsche Hofbildung, Weichsel-Nogat-Delta

Abb. 10

man aber auch noch den alten hohen Dielenraum auf und an der Hinterseite des Hofes steht nunmehr ein breitgelagertes eingeschossiges Haus mit einem mittleren Küchenflur und Wohnräumen rechts und links davon. Im Weichsel-Nogat-Delta, wo eine Art Dreiständerhaus (also einseitige zweigeschossige Abseite) überwogen hatte, fügte man dessen freier Dielenlängsseite kreuzförmig ein paar Ofenstuben an, dann wurde dieser Anbau auch noch auf der anderen Seite ergänzt, bis schließlich der Hinterflügel fortfiel und sich auch hier ein Breitenhaus ergab, das man in der Hauptsache auch nur eingeschossig anlegte, so daß es sich genau wie das hinterpommersche von einem oberdeutschen Hause, das sich vom Stall getrennt hat, in keiner Weise unterscheidet, ohne ursprünglich mit ihm irgend etwas zu tun gehabt zu haben. Diese seine selbständige Entstehungsgeschichte bleibt ja auch immer durch die Sonderart seiner Stellung zum Hofe erkennbar, die sich nach wie vor als eine grundsätzlich andere als wie bei der entsprechenden oberdeutschen offenen Hofbildung darstellt (Abbildung 11).

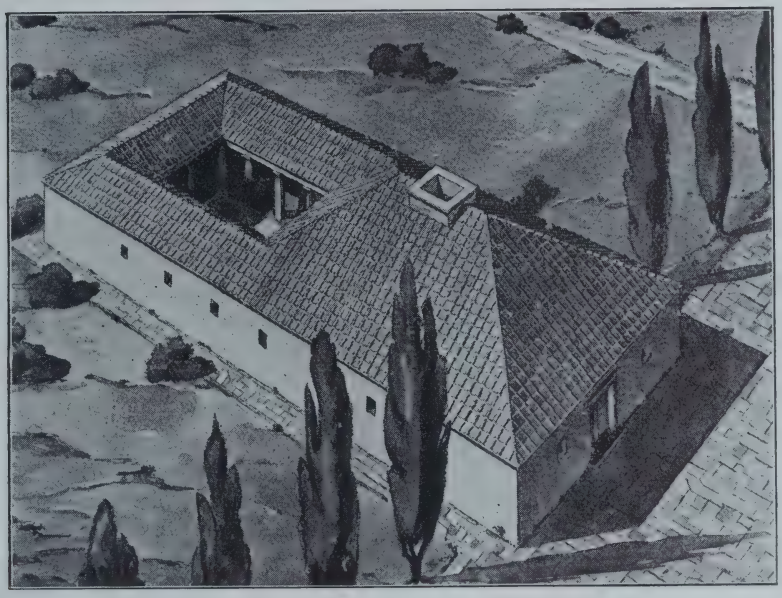
Die Neigung des Niederdeutschen, im Kolonisationsgebiet zur Anlage lauter ganz getrennter Wirtschaftsgebäude überzugehen, wird immer eine auffallende Tatsache bleiben, ihre Erklärung könnte sie höchstens in der Richtung finden, daß er sich hier durch das Beispiel der slawischen Vorbevölkerung habe beeinflussen lassen, in deren verhältnismäßig dünne Besiedlung des Landes er eingeschoben wurde. Denn daß bei dieser das Vielhaus-System genau wie bei ihren Vorgängern im Lande, den Ostgermanen, herrschte, wurde ja schon anfangs er-



Niederdeutsche Hofbildung mit Breitenhaus, Weichsel-Nogat-Delta

Abb. 11

wähnt. Bei solchen bäuerlichen Anwesen handelte es sich in der Hauptsache um einen ziemlich unregelmäßigen, aus einer Anzahl kleinerer Einheiten bestehenden Haufenhof, der im allgemeinen weder in der Art seiner Ausführung, noch seines Betriebes für den deutschen Siedler etwas Vorbildliches gehabt haben dürfte. Nur die grundsätzlich getrennt angeordneten Wirtschaftsgebäude mußten ihm auffallen und dann ein Bauglied, das er in der hier üblichen Art der Verwendung nicht kannte; das ist die dem Hauseingang angefügte Vorlaube. Dieses Glied entsprang auf ostindogermanischem Gebiete wohl dem naheliegenden Bedürfnis, bei Errichtung von nur lauter kleinen einzelligen Häusern wenigstens einen geschützten Vorplatz als Nebenraum für diese zu schaffen. Ursprünglich scheinen derartige Lauben vor allem am Eingange zum wichtigsten Wohnraum angelegt worden zu sein, dann aber verschwindet sie hier des öfteren, da dieser Raum vielfach mit einem anderen verschmolzen wurde, wobei sich die ursprüngliche Vorhalle zu einem mit Wänden abgeschlossenen mittleren Eingangsflur umwandelte und auf diese Weise ein von der Breitseite aus zugängliches mehrzelliges Haus entstand, das damit ein dem oberdeutschen Hause sehr ähnlichen Grundriß erhielt. Deswegen gab man aber die Vorlaube nicht ganz auf, sondern sie wurde nun einem anderen bevorzugten Raume angefügt, und zwar dem Speicher, der zur Aufbewahrung der wertvollsten Vorräte diente. Tatsächlich finden wir noch heute überall Spuren einer Vorhalle, sobald wir uns der alten Westgrenze der Ostgermanen nähern



Das pompejanische Haus

Abb. 12

oder sie überschreiten, und zwar nicht nur da, wo sich alte slawische Eigenart erhalten, sondern auch bei den Anwesen der westdeutschen Siedler, deren Haus- oder Hofanlage sich sonst ganz deutlich als aus der alten Heimat mitgebracht erweist, möge es sich nun um ober- oder niederdeutsche Herkunft handeln. Wurde die Vorlaube aber den großen westlichen Einhaustypen angefügt, so paßte sich deren Maßstab auch ihr eigener an, d. h. sie gestaltete sich hier wesentlich stattlicher und erhält auch eine weitergehende Verwendung. Aus dem kleinen überdachten Vorplatz vor der Eingangstür entwickelt sich jetzt eine stattliche Unterfahrt und über dieser ordnet man einen Speicher an, der das wichtigste Ergebnis ländlichen Fleißes, das ausgedroschene Getreide, aufnimmt. Und dieser Speicherraum kann durch eine Klappe im Boden von dem in die Laube einfahrenden Wagen aus beschickt oder entleert werden. Wir finden, wie schon gesagt, diese Vorlaube sowohl beim ober- wie niederdeutschen Hause des östlichen Kolonisationsgebietes, nur ist ihre Stellung bei beiden eine verschiedene. Die Laube gehört ihrem Ursprung nach nun einmal vor den Hauseingang und wird auch immer nur hier angeordnet. Da dieser beim oberdeutcshen Hause an der Längsfront liegt, wurde sie letzterem auch an dieser Stelle angegliedert. Beim niederdeutschen Hause, das den Giebel mit dem Einfahrtstor nach vorne wendet, wäre sie entsprechend hier anzubringen gewesen. Das ist aber nicht gut möglich, denn sie müßte dann eine Höhenentwicklung erhalten, mit der sich ihr Schutzzweck nicht mehr verträgt, und ebenso wäre so die Anlage eines Speichers über ihr eine sehr unprak-

tische Einrichtung, daher finden wir denn auch beim niederdeutschen Hof Pommerns entsprechend der Stellung seines alten Haupthauses niemals eine Vorlaube angefügt. Anders beim niederdeutschen Hof des Weichsel-Nogat-Deltas und der ostpreußischen Küste. Hier steht das alte Einhaus, wie wir gesehen haben, an der Straße und wendet dieser seinen Wohnteil zu. Da letzterer von hier aus immer einen Zugang gehabt zu haben scheint (ursprünglich überwiegt hier wohl ein Grundriß mit durchgehender Längsdiele), konnte vor diesem, der ja nur eine bescheidene Tür darstellte, die Vorlaube gut angeordnet werden und im Dach oder Oberstock der übliche Speicher zur Ausführung kommen (Abbildung 10). Das ist in den genannten Gebieten auch überall geschehen, und als sich dann hier die oben geschilderte Metamorphose des alten großen Tiefenhauses zu einem Breitenhause vollzieht, finden wir entsprechend vor der Mitte seiner Breitseite überall die stolze Vorhalle mit dem Speicher darüber (Abbildung 11).

Wir sehen also, wie sich bei der Wiedergewinnung des einst germanischen Ostens durch unsere Vorfahren eine Verschmelzung uralten west- und ostindogermanischen Kulturgutes vollzieht, indem einmal das große niederdeutsche Haus eine einheitliche stattliche Hofbildung durch räumliche Verselbständigung der einzelnen Wirtschaftszweige entwickelt und dann beide, ober- wie niederdeutsches Haus, soweit als irgend möglich die östliche Vorlaube übernehmen und sie zu einem ihrem Maßstabe angepaßten großen Hauptbaugliede ausgestalten. Dadurch entstehen hier bäuerliche Haus- und Hofbildungen, die eigentlich alles übrige auf diesem Gebiet an Großzügigkeit und monumentaler Wirkung in Anlage wie Aufbau in den Schatten stellen.

Nun scheint es aber fast, als ob sich ein ähnlicher interessanter Vorgang schon einmal etwa 2000 Jahre früher im Süden des west- und ostindogermanischen Grenzgebietes abgespielt hätte. Daß das ostindogermanische Vorlaubenhaus ein sehr hohes Alter besitzt, hat die prähistorische Forschung in letzter Zeit einwandfrei bewiesen. Es zweifelt heute wohl niemand mehr daran, das es einst vom Norden die Donau hinab nach Griechenland gewandert ist und hier das Vorbild für den sogenannten Megarontyp des dortigen Palastes wie für den ersten Säulenbau des Tempels abgegeben hat. Nach dem Muster des mittelländischen Hauses reihten sich dann im Wohnbau Megaron neben Megaron mit ihren Vorhallen um einen Innenhof zusammen und so entstand das typische griechische Haus mit dem Peristyl in der Mitte. Nun besitzt aber auch Italien in seinem Atriumhause ein uraltes Gebilde, bei dem sich in ganz ähnlicher Weise die kleineren Einzelräume um einen großen inneren Zentralraum aneinander reihen. Wie sehr letzterer in seiner späteren reicheren Entwicklung auch dem griechischen Peristyl ähnelt, so dürfte er seine Entstehung doch ganz anderen Voraussetzungen verdanken. Er war ursprünglich nicht offener Hof, sondern geschlossener Innenraum mit einer Dachöffnung zum Abzug des Rauches im Dachfirst, denn er enthielt den alten offenen Herd, und daher erklärt sich auch sein Name Atrium, die rauchgeschwärzte Halle. Eine solche Einrichtung würde für südliche Länder etwas sehr Unwahrscheinliches bedeuten, hier spricht alles für einen nordischen Ursprung und ist man auf die überraschende Ähnlichkeit dieser Hausanlage mit dem niederdeutschen Hause schon seit langem aufmerkam geworden. Findet sich bei diesem italienischen Hause in den das Atrium

in seinem hinteren Teile verbreiternden alae doch sogar ein merkwürdiges Analogon zum Fleet des Niedersachsen, und hat wieder dessen Hausanlage, wie alte Miniaturen beweisen (Breviarium Grimani), ursprünglich doch auch eine Öffnung am Dachfirst besessen. Über das Alter der oberdeutschen wie niederdeutschen großen Einhausanlagen hat uns die prähistorische Forschung allerdings bisher keine so klaren Aufschlüsse gebracht, wie über das kleine ostindogermanische Vorlaubenhaus, aber es deutet doch so manches auf sehr altes Vorkommen großer Hallenhäuser auf keltischem Gebiet, und eine deutliche Sprache redet doch auch die Aschenurne von Chiusi mit ihrem Walmdach und der Firstöffnung in der Mitte. Daß diese Urne bei ziemlich flachem Dach statt des unter diesen Umständen zu erwartenden Giebelabschlusses eine Walmbildung zeigt, scheint mir ein deutlicher Hinweis dafür zu sein, daß es sich dabei ursprünglich um ein vom Norden kommendes steiles Dach gehandelt hat, das erst unter südlichen Voraussetzungen allmählich abgeflacht wurde. Nun vereinigt sich im pompejanischen Hause die alte italische Atriumsanlage mit einem hinten angeschlossenen griechischen Peristyl zu einer sehr stattlichen Einheit (Abb. 3c u. 12). Ist aber das Atriumhaus einst ebenso als altes westindogermanisches Kulturgut in den Süden gebracht worden, wie das für das ostindogermanische Vorlaubenhaus festzustehen scheint, dann haben wir hier tatsächlich einen ganz ähnlichen Verschmelzungsvorgang beider Kulturen, wie wir ihn im ostdeutschen Kolonisationsgebiet feststellen zu können glaubten, und zwar mit dem gleichen Erfolg, daß auch für die Antike dadurch eine ihrer monumentalsten Raumschöpfungen zustandegekommen ist.

Artilleristisches an griechischen Festungen

Von Prof. Dr. Fritz Krischen

Antike Ingenieurbauten sind in solcher Fülle erhalten, daß man sich wundern darf, einen wie geringen Raum verhältnismäßig ihre Darstellung in Kultur- und Kunstgeschichte einnimmt. Ihre Untersuchung ist gewiß lohnend. Griechische Festungen z. B. gehören zu den monumentalsten Überbleibseln des Altertums und sind auch stellenweise ganz vorzüglich erhalten; vielfach liegen die umgestürzten Trümmer selbst ohne Ausgrabung greifbar zutage, so daß ihre zeichnerische Wiederherstellung ohne weiteres möglich ist. Diese Trümmer geben aber nicht allein Aufschluß über die Bauwerke selber, sondern auch über maschinelle und artilleristische Einrichtungen, obwohl solche mobilen Dinge natürlich immer restlos verschwunden sind. Zum Glück werden wir durch antike Fachschriften gründlich über dieses Gebiet unterrichtet, so gut, daß Geschütze in verschiedenen brauchbaren Typen nachgebaut werden konnten, mustergültig in neuerer Zeit durch H. Diels und E. Schramm. Indem wir die so gewonnenen Kenntnisse von antiker Artillerie benutzen, dürfen wir es versuchen, Spuren an den Gebäuden, die auf die Armierung hinweisen, eingehend auszudeuten. Es mag im folgenden kurz an vier Beispielen geschehen, die mir aus eigener Anschauung bekannt sind.

Tafel I zeigt einen großen Turm der hellenistischen Befestigung von Herakleia am Latmos in Kleinasien (vom Verfasser in den Milet-Heften der Berliner Museen — Band III Heft 2 — veröffentlicht). Diese wie die weiteren Abbildungen gibt den Bestand des Bauwerkes, der hier übrigens wenig eingebüßt hat, durch Binnenzeichnung der Steine wieder, während die Ergänzungen leer bleiben. In unserem Turme sind die wesentlichen Schußmöglichkeiten sämtlich durch besondere Öffnungen vertreten: dem einfachen Schuß geradeaus etwa mit Pfeilgeschützen, von denen hier ein Mehrlader nach Philon skizziert ist, diente eine schmale Schießscharte mit normaler Brüstungshöhe (s. Tafel I, Schnitt γ—δ), für den Schuß im Bogen, zu dem wir das Palintonon genannte Kugelgeschütz nach Heron, Philon und Vitruv wählen, müssen die hoch gelegenen Schießscharten im Untergeschoß bestimmt gewesen sein (s. Tafel I, Schnitt α—β). Ferner für die Wirkung gerade nach unten an den Fuß von Turm oder Mauer, der im toten Winkel der beiden angeführten Geschützarten liegt, sind große fensterartige Öffnungen im Obergeschoß vorgesehen, die nach vorn durch Läden geschützt werden; letztere sind durch seitliche Löcher der Fensterbrüstungen gekennzeichnet, durch die ihre Stützen geführt werden.

Damit sind gewissermaßen die Elemente der Armierung gegeben.

Das zweite Beispiel führt uns ebenfalls nach Kleinasien — nach Assos gegenüber Mytilene — und in dieselbe Zeit nach 300 v. Chr. Der vorzüglich erhaltene Rundturm, von dem noch die höchsten Steinlagen mit den Einbettungen für Sparren

und Deckenbalken vorhanden sind, ist durch eine stattliche Bogenöffnung zugänglich. Er ist zweigeschossig, aber nicht so, daß ihn eine gewöhnliche Decke in zwei Räume teilte — dem widerspricht schon die Höhe der Türöffnung —, sondern lediglich durch einen eingelegten Boden, der von vier noch vorhandenen Konsolen getragen wurde. Dieser Boden diente zweifellos für leidlich große Geschütze, die die seitlichen Mauerstücke flankieren sollten (s. Tafel II); die zugehörigen Schußöffnungen sind freilich hier mit der Wand verschwunden, aber durch den sonstigen Befund gesichert.

Die Anbringung eines solchen Bodens an Stelle einer Decke, sein Verhältnis zur Tür und zu einer noch zu nennenden wichtigen Tatsache: dem Vorhandensein eines kräftigen Steinringes oben in der Mitte der Turmrundung noch eben gegenüber der seitlich verschobenen Tür, kann ich mir nur durch eine zu ergänzende Vorrichtung erklären, die zur Beförderung der schweren Steinkugeln auf den Geschützboden diente, wie sagt das Bild deutlicher als jede Beschreibung. Dieser Aufzug bewirkte und erklärt auch die seitliche Verschiebung der Tür, die in symmetrischer Anlage eine zu große Breite erfordert hätte.

Die Schießscharten unter dem beschriebenen Boden haben ähnliche Bedeutung wie die auf Tafel I, γ—δ.

Veröffentlicht ist der Turm in dem Werke von J. T. Clarke, F. H. Bacon, R. Koldewey: Investigations at Assos, das aber die Erklärung der geschilderten Verhältnisse schuldig bleibt.

Während es sich bisher um leichte und mittlere Artillerie sowie ihre Munition handelte, möge jetzt ein Bau folgen, dessen Platz schon als beherrschendes Werk einer Zitadelle und dessen Aufgabe, über ein dreifaches Grabensystem hinüberzuwirken, die schwerste Artillerie erwarten läßt. Es ist die mächtige Batterie auf dem Euryalos genannten Felsen, den Dionys der Große bald nach 400 v. Chr. zum Hauptbollwerk von Syrakus gestaltet hat. Dieses Werk hat man früher zuweilen die fünf Türme genannt; man meinte damit fünf Mauerklötze, die sich durch senkrechte Fugen von den Füllstücken zwischen ihnen trennen, aber doch mit ihnen ein geschlossenes längliches Rechteck bilden (s. d. Grundriß auf Tafel III), ohne, wie es Türmen zukäme, flankierend aus der Mauerflucht vorzuspringen. Diese senkrechten Fugen, die beim Aufriß des Systems besonders stark auffallen, bedürfen natürlich einer Erklärung. Sie muß darin zu finden sein, daß die Zwischenstücke Geschützstände waren, und zwar für besonders schwere Geschütze mit erheblichem Rückstoß, dessen Übertragung auf das übrige Gebäude verhindert werden sollte. Die seitlichen Rücksprünge der hochgehenden fünf Pfeiler sind durch kammerartige Erweiterungen bedingt, die den eigentlichen Geschützraum darstellen (s. Tafel III Querschnitt α—β).

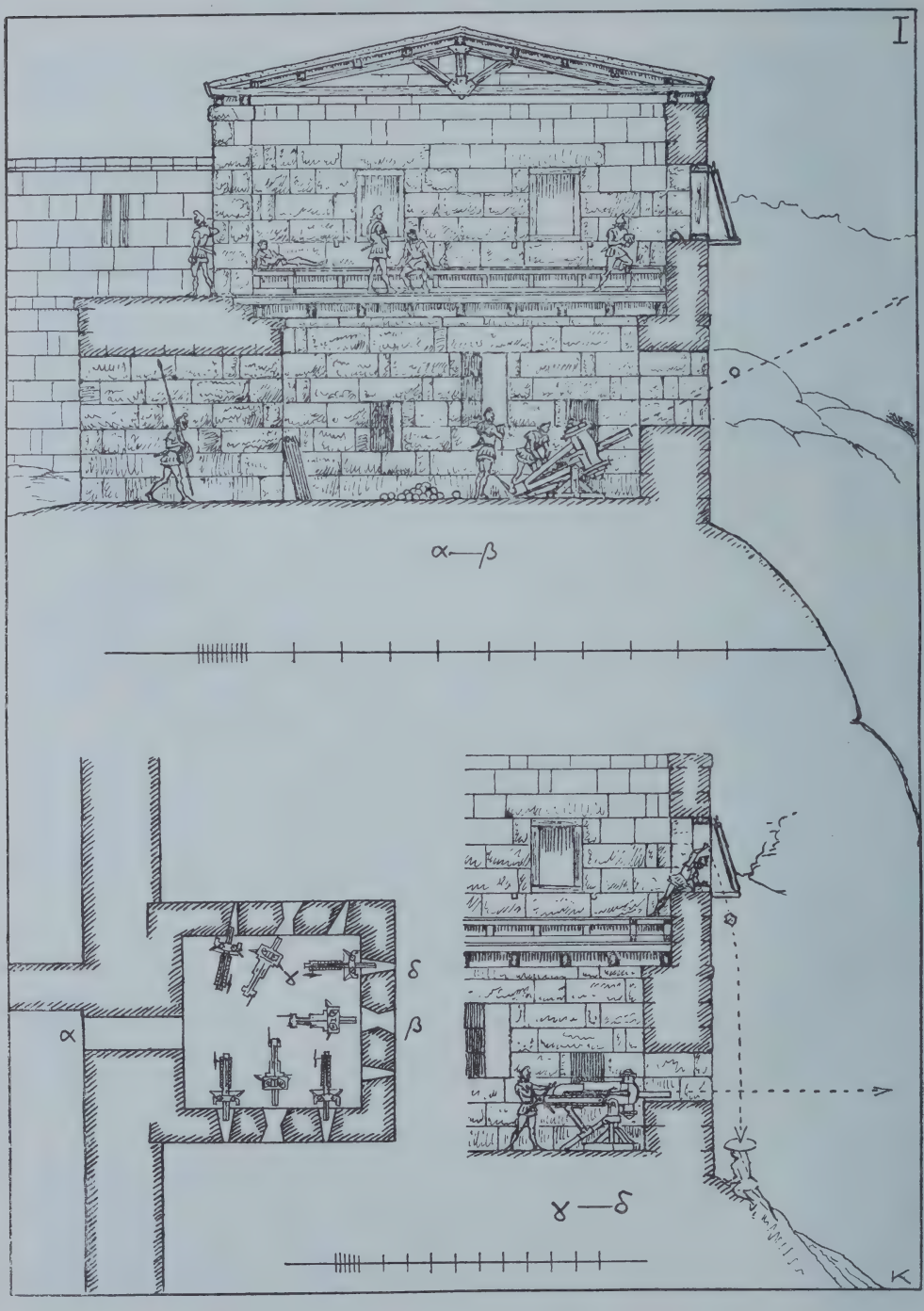
Über den weiteren Oberbau geben Wasserspeier als Löwenköpfe, Steine eines „falschen" Gewölbes, Gesimsblöcke und Fenstersteine Aufschluß, die wir unter den herumliegenden Trümmern feststellen konnten (in der Zeichnung durch Strichelung hervorgehoben). Es dürfte daraus eine obere Plattform folgen, die mittlere Geschütze auf den Pfeilern, leichte auf den Gewölbemitten trug. Damit die Plattform von den Stößen der schweren Geschütze wirklich unberührt blieb, mußten auch

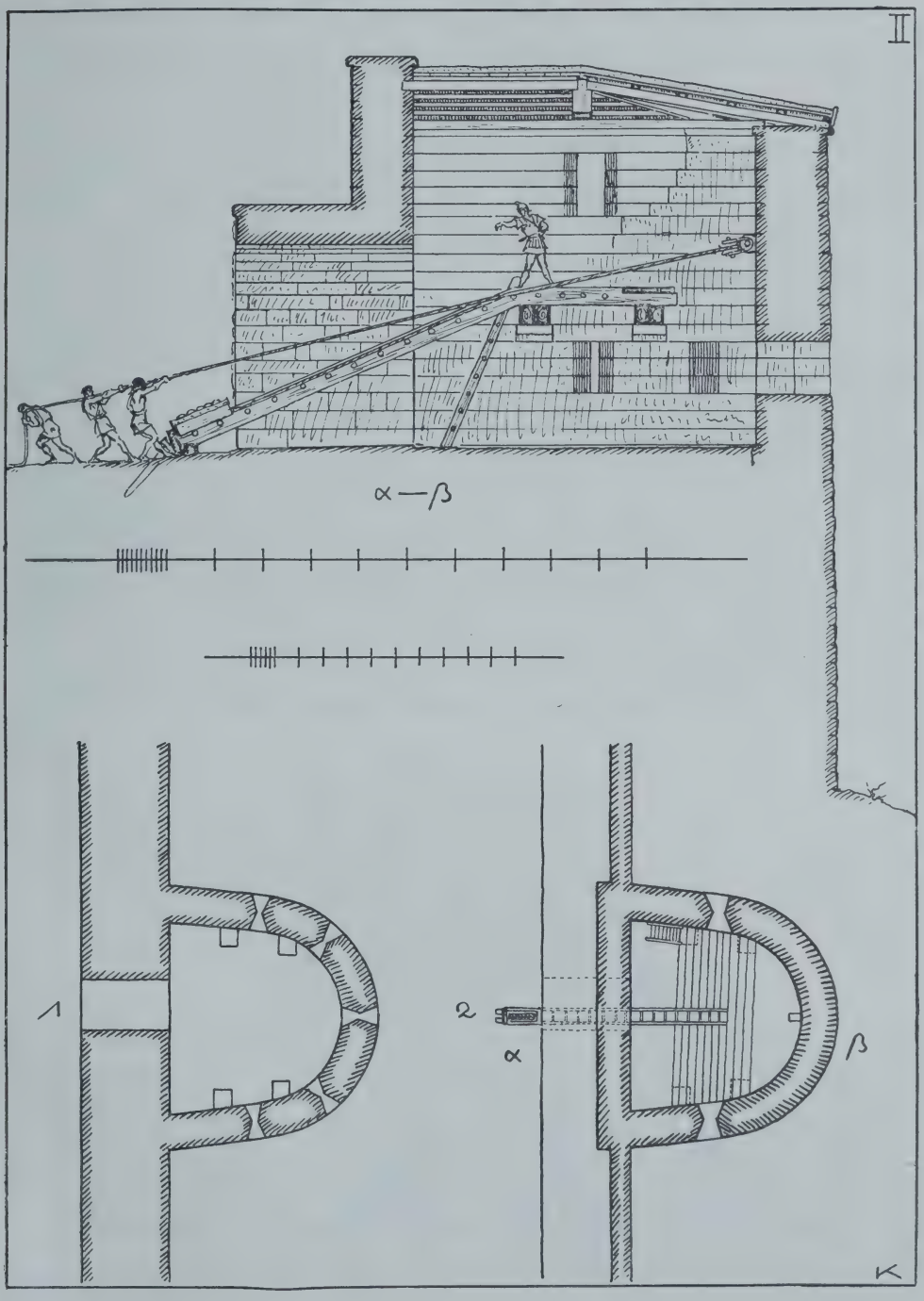
die Schildmauern der Kammern außer Verband bleiben; wir haben sie uns zinnenartig gedacht: die großen Geschütze haben die Form des sogenannten Onagers erhalten, eine Form, die sowohl in der Antike wie im Mittelalter gebräuchlich war.

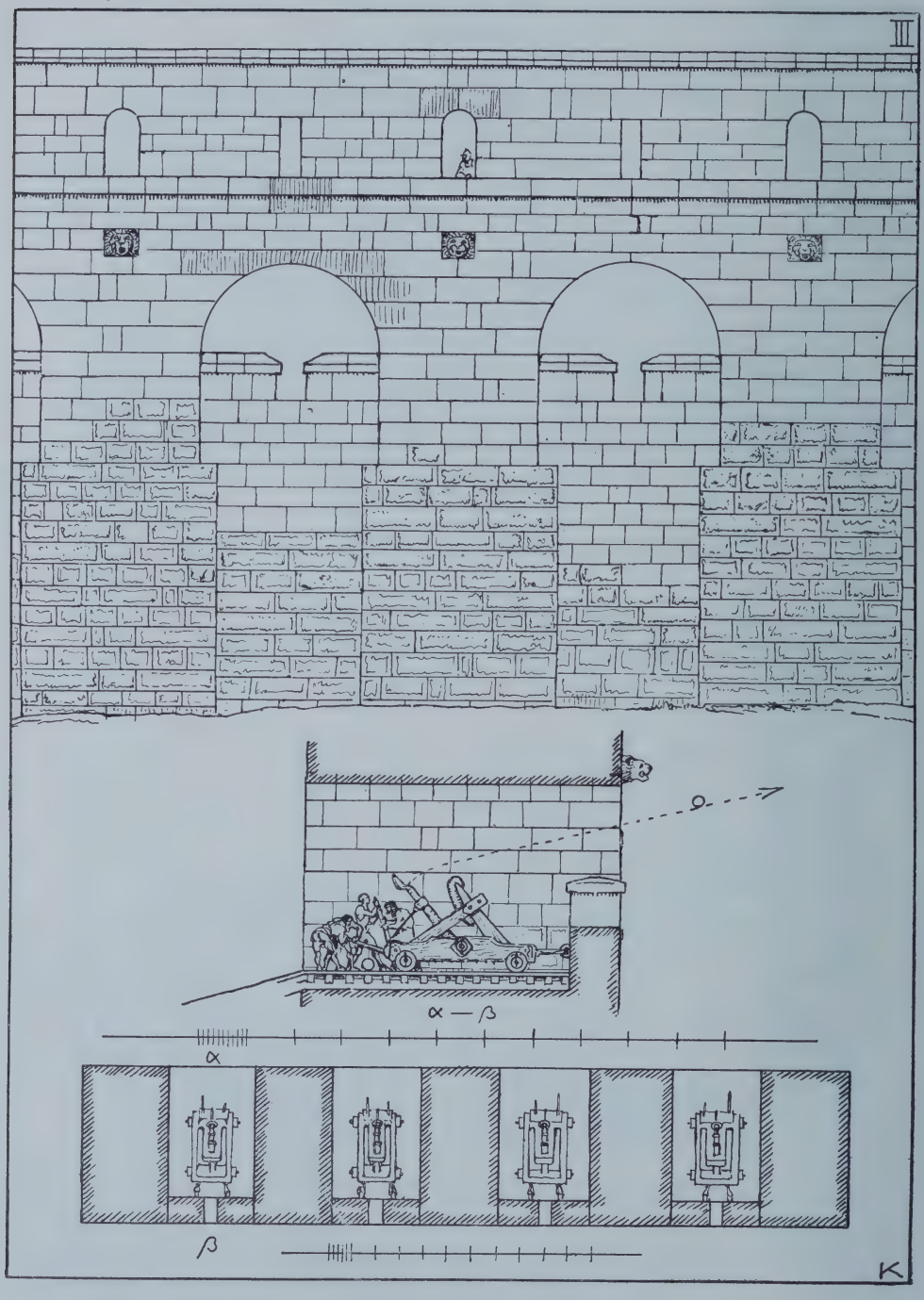
Eine ausführliche Veröffentlichung dieser Dinge wird von uns vorbereitet, zu der auch das folgende letzte Beispiel gehört — ein Kuriosum in der griechischen Befestigungskunst.

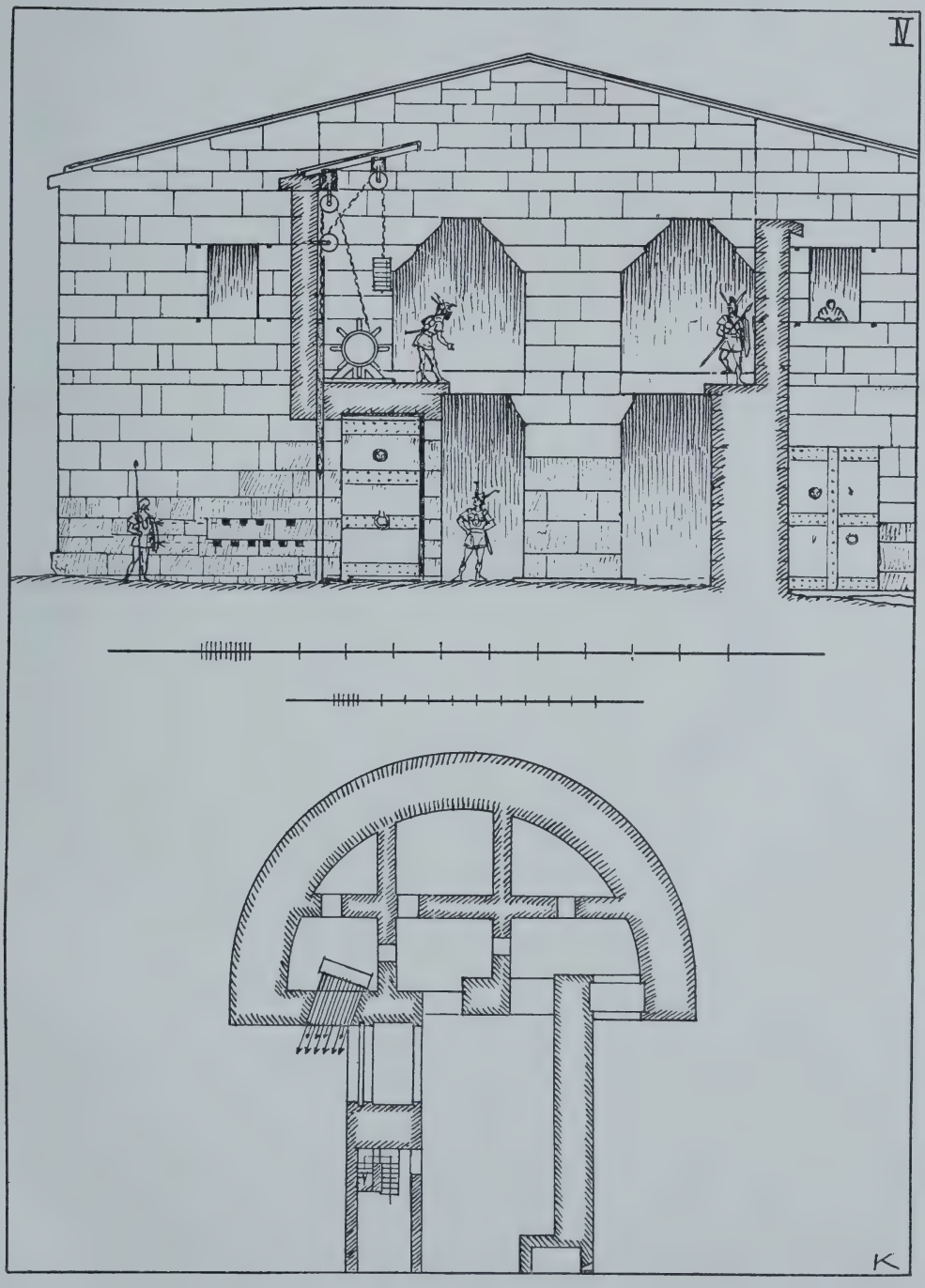
Der Zugang zum Haupttor von Selinunt wird durch eine eigenartige und verwickelte Anlage geschützt, die wesentliche Züge mit dem Euryalos gemeinsam hat und sicherlich auch der Zeit des Dionys angehört. Das am weitesten vorgeschobene Werk ist eine halbmondförmige Bastion, von der wir hier die Verteidigung des einen Tores, des linken auf der Ansicht Tafel IV, zu betrachten haben. Wir bemerken außerhalb des Tores, das durch ein Fallgatter zu schließen war, zwei Reihen von ungefähr quadratischen Löchern, die ganz nach Art der Läufe einer Mitrailleuse angebracht sind — und eine Mitrailleuse, wenn auch eine etwas schwerfällige, ist das hier in der Tat. Die beiden Reihen liegen gerade in Bauch- und Brusthöhe eines vor dem Tore stehenden Mannes. Innerhalb des Halbmondes befindet sich der Fußboden wenig unter der unteren Reihe — von innen hindurch zu sehen oder zu zielen, war also kaum möglich. Es wird hier eine Maschinerie angebracht gewesen sein, mit der man, ohne den Feind sehen zu müssen, Salven von eisernen Pfeilen auf diejenigen schoß, die sich einfallen ließen, das Tor zu berennen. Bei der geringen Entfernung war die Durchschlagskraft, über die wir ja von den alten Kriegsschriftstellern manches erfahren, groß genug, um selbst zwei geharnischte Männer hintereinander aufzuspießen. Man mag sich hier ein blutiges Bild in der Art von Flauberts Salambo ausmalen.

Für den sonstigen Aufbau des Werkes, das nur im Erdgeschoß erhalten ist, waren wiederum herumliegende Einzelstücke maßgebend, von denen z. B. die Gesimse Dachschalung und Neigung erkennen ließen, während Treppen zu den Wehrgängen Höhen ergaben usw., wie überhaupt die gebotenen Herstellungen mehr die Ergebnisse eines schlichten Rechenexempels als Erzeugnisse einer aufgeregten Phantasie sein wollen, wenn die Resultate auch hier und da etwas phantastisch anmuten sollten.


I
α—β
α
β
δ
γ—δ
K


II
α—β
1
2
α
β
K


III
α — β
α
β
K


V
K

BAUINGENIEURWESEN

Vom Lehrstuhl für Stadtbauwesen und Straßenbau und der Straßenbauforschungsstelle Ostpreußen

Von Prof. Karl Hoepfner

Dem Zweck dieser Festschrift glaube ich am besten zu dienen, wenn ich einen Einblick zu geben suche in das Wirken und Streben, die Ziele und Nöte meines Lehrstuhles, damit auch der Fernerstehende ein gewisses Bild davon zu gewinnen vermag.

Das wäre nun freilich ein recht vielseitiges Thema, über das sich viele Seiten schreiben ließen. Während die anderen Untergebiete des Bauingenieurwesens an unserer Hochschule mit je zwei Lehrstühlen ausgestattet sind, hat mein Lehrstuhl umgekehrt zwei Gebiete zu betreuen: das Stadtbauwesen und den Straßenbau. Beides verhältnismäßig junge Sprosse am Stamme der Ingenieurwissenschaften, die sich zwar in neuer Zeit stark und kräftig zu dehnen und zu wachsen anschicken, aber sich erst Bahn brechen, auswachsen und Raum und Geltung schaffen müssen.

Die Wahl, über welches von beiden Gebieten ich schreiben soll, wird mir dadurch erleichtert, daß ich das Stadtbauwesen als Gebiet der Ingenieurwissenschaften nicht nur in früheren Aufsätzen und Büchern behandelte, sondern darüber auch im Jahre 1925 einen Beitrag zur Festschrift aus Anlaß der Hundertjahrfeier der Technischen Hochschule Karlsruhe lieferte. Ich habe genügend dargelegt, wie groß und vielseitig dieses Gebiet ist, das wieder zerfällt in die großen Untergruppen:

des Städtebaues, d. h. der planmäßiger und weitschauender Städtebaupolitik bedürfenden Gestaltung des Stadtganzen als Siedlungsstätte der Bürgerschaft, ihrer Wirtschaft und Gewerbe;

der Städtereinigung als Grundlage der Gesundheit, Ordnung und des kulturellen Hochstandes der Einwohner und der heute in besonders starker Entwicklung begriffenen Technik der Unterbringung und Behandlung der städtischen Abfallstoffe;

der Wasserversorgung und

des städtischen Verkehrswesens, dessen Probleme jedermann täglich zum Bewußtsein kommen.

Auf diese Gebiete will ich heute nicht weiter eingehen. Nur eine Frage möchte ich ganz kurz anschneiden:

Wenn man bedenkt, daß rund 65 % aller Deutschen in Städten leben, und daß, wie man allerseits zugibt, die Körpergebilde der Städte nur sehr unvollkommen den Ansprüchen genügen, die Menschen und Wirtschaft an sie als Siedlungsstätte stellen können und auf Grund der starken Wandlung aller Dinge und Verhältnisse in dem letzten halben Jahrhundert stellen müssen, wenn sie im harten Daseinskampf der Menschen und Völker leistungs- und wettbewerbsfähig bleiben wollen, wenn man weiter bedenkt, wie gewaltige Summen jährlich die Städte für spezifisch

städtische Ingenieuraufgaben verwenden, ist es da nicht erstaunlich, daß die Städteverbände nicht etwas mehr bemüht sind, die Lehrstühle für Stadtbauwesen an den Technischen Hochschulen als Forschungs- und Lehrstätten zu pflegen, in ihren Dienst zu stellen, voranzutreiben und zu unterstützen? Sind sie doch sonst stets auf dem Platze, wo es gilt, für ihr Interesse zu kämpfen. Ist es richtig zu sagen, das Hochschulwesen sei Angelegenheit des Staates? Weshalb sind erst so spät Lehrstühle für Stadtbauwesen geschaffen worden? Weshalb sind die bestehenden so kümmerlich ausgestattet, daß die Kraft der Lehrstuhlinhaber gegenüber der Fülle der Probleme, die wissenschaftlicher Durcharbeitung bedürfen, wie Zwerge gegen ein Heer von Riesen stehen, anstatt daß man die Lehrstühle zu leistungsfähigen Instituten ausbaut, deren Arbeit und Wirken in enger Fühlung mit den Städteverbänden erfolgt, mit ihnen vereinbart und von ihnen überwacht wird? Wäre es nicht besser, die Städte sorgten selbst für alles Notwendige, wenn der Staat es unterläßt, und suchten selbst nach Mitteln und Wegen, um die Lehrstühle für Stadtbauwesen zu einem wirksamen Werkzeug für die Erfüllung ihrer Bedürfnisse zu machen, nähmen in gleicher Weise, mit einem Wort gesagt, ihr Interesse wahr, wie es jede Industrie hinsichtlich der Lehrstühle tut, die ihr nahestehen?

Hier liegt ein Weg offen, dessen Beschreitung für die künftige Entwicklung und Stützung der Hochschule von weittragender Bedeutung zu werden vermag.

Der Straßenbau, also das zweite meinem Lehrstuhl anvertraute Gebiet, ist Fachleuten und Laien allgemein bekannt in seiner sich überstürzenden Entwicklung während des letzten Jahrzehntes, der Fülle der Neuheiten, der Fülle der Probleme und der Schwierigkeit, wenigstens für die dringendsten Aufwendungen die erforderlichen Geldmittel zu beschaffen.

Es bedarf keiner langen Auseinandersetzungen, um zu belegen, daß es äußerster Anstrengung bedarf, um auf einem solchen Fachgebiet in Zeiten wie heute nicht den Überblick und die Sachbeherrschung zu verlieren.

Hierin nun ist den Lehrstühlen eine Hilfe von ganz unschätzbarem Werte dadurch zuteil geworden, daß das Reichsverkehrsministerium im Zusammenwirken mit den Staatsverwaltungen an allen Technischen Hochschulen unter der Bezeichnung von Straßenbauforschungsstellen Institute schuf, die deren Leiter befähigen und — zwingen, mit der Praxis und für die Praxis arbeitend in engster Fühlung mit dem Fachwesen und seiner Entwicklung zu bleiben. Über das auch an der Technischen Hochschule Danzig bestehende Institut dieser Art, sein Entstehen, seine bisherige Arbeit und künftige Bestrebungen und Ziele etwas zu sagen, möchte ich im besonderen in diesem Aufsatz mir als Aufgabe stellen.

Die Straßenbauforschungsstelle Ostpreußen

Von Kriegsende bis Herbst 1928, zu welcher Zeit auch die Technische Hochschule Breslau eine Bauingenieurabteilung erhielt, war Berlin die östlichste Hochschule Preußens, die mit einer solchen ausgestattet war. Denn Danzig war verlorengegangen. Das muß man sich gegenwärtig halten, um die wahre Bedeutung unserer Anstalt richtig einzuschätzen: Wenn der West- und Süddeutsche dieses

Gebiet durchfährt, wird ihm erst bewußt, welche riesigen Flächen unseres Vaterlandes der Osten bildet. Breslau liegt weitab südlich von der Hauptmasse. Danzig also muß und wird die deutsche Technische Hochschule für den Osten bleiben.

Je ärmer unser Osten ist, hart ringend mit Nöten auch schon vor dem Kriege, noch schwerer getroffen durch die Folgen des Kriegsausganges als die übrigen Lande, desto wichtiger ist es, alle Kräfte des Geistes und Willens im Ringen einzusetzen und somit, neben vielem anderen, auch unsere Hochschule zu einem starken Werkzeug im Kampf ums Dasein des Ostens zu machen.

Der Größe des Gebietes entspricht die Länge der Straßen, der Armut der Provinzen und Kreise deren Zustand und die Schwierigkeit des Problems, sie instand zu setzen nach der Kriegszeit, die besonders im Kampfgebiet Ostpreußens starke Schäden auf ihnen hinterließ, und sie so herzurichten, daß sie den neuzeitlichen Beanspruchungen durch den Verkehr standzuhalten vermögen.

Diesen Erwägungen haben sich mit dankenswerter Selbstverständlichkeit das Reichsverkehrsministerium und das preußische Kultus- und Finanzministerium nicht verschlossen. Als nun alle deutschen Technischen Hochschulen mit Straßenbauforschungsstellen ausgestattet wurden, gelang es der tatkräftigen Initiative des Stadtbaurats der Stadt Königsberg, Herrn Dr.-Ing. e. h. Kutschke, im Einvernehmen mit der Provinz Ostpreußen, die Gewährung entsprechender Mittel auch für den Osten zu sichern. Das Institut wurde an die Technische Hochschule Danzig angegliedert und der Inhaber des Lehrstuhles für Straßenbau mit dessen Einrichtung und Leitung beauftragt.

Der Aufgabenkreis, dessen Bearbeitung sich die Straßenbauforschungsstelle Ostpreußen zu widmen hat, erhält durch die Art ihrer Entstehung ein besonders klares und eindeutiges Gepräge. Sie ist geschaffen, um dem Straßenbau im allgemeinen, besonders aber in den Ostgebieten zu dienen. Und aus diesem Beruf des Institutes, Dienerin und Werkzeug aller der Kreise zu sein, die an der Lösung der Straßenfrage arbeiten, ergeben sich bestimmte Richtlinien für die Wege, auf denen sich ihre Betätigung zu bewegen hat.

Als allgemeines Ziel ist zu erstreben die Unterstützung der Praktiker aller Art, — Behörden, Bauunternehmungen und Baustoffindustrie — in ihrem Bemühen, durch geschickteste Anwendung der in nur sehr beschränktem Ausmaß verfügbaren Geldmittel unser Straßennetz auf ein Höchstmaß der Leistungsfähigkeit zu bringen.

Um diesem Ziel zuzustreben, sind drei Wege einzuschlagen:

1. Die Baustoffkontrolle und Baustoffprüfung:

Wohl auf wenigen anderen Gebieten des Ingenieurwesens gibt es eine so schier überschäumende Fülle an Baustoffen und Bauarten, unter denen der Praktiker zu wählen vermag, wie auf dem des Straßenbaues. Ebenso aber ist auch auf keinem anderen Gebiet eine solche Fülle von Baustoffen und Bauarten für ein an sich gleichartiges Baugebiet erforderlich und am Platze wie im Straßenbau. Denn im Rahmen des geplanten Straßennetzes hat fast jede Einzelstrecke für sich anderen Ansprüchen, gegeben durch Verkehr, Klima und sonstige örtliche Vorbedingungen, zu genügen als andere Strecken im gleichen Bezirk. Es ist also notwendig, in jedem

Einzelfall sorgsam zu erwägen, welchen Baustoff und welche Bauart man anwenden muß, um mit möglichst geringem Aufwand den wünschenswerten Effekt an Güte der Straße zu erzielen. Sofern dieses gelingt, sind bei der gewaltigen Ausdehnung des Straßennetzes mit einer Fläche von rund 1 Milliarde qm gewaltige Ersparnisse zu erzielen oder kann umgekehrt gewaltige Vergeudung von Mitteln vermieden werden.

Sowohl die Bauämter, wie auch die Bauunternehmungen und die Baustoffindustrie haben das größte Interesse daran, zu wissen, worin die Stärken und Schwächen, die Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsfähigkeit der Baustoffe und Verfahren liegen. Denn jeder Fehlschlag schädigt nicht nur die Allgemeinheit, sondern auch die Geschäftsleute selbst. Jeder übertriebene Aufwand für die einzelne Strecke schmälert das Maß an Aufträgen, die erteilt werden könnten, wenn das beschränkte Maß an Geldmitteln nicht unnötig für einzelne Objekte vergeudet würde.

Nun ist es leider bislang — und vermutlich noch auf lange Zeit — unmöglich, Tabellen, Formeln und Rezepte aufzustellen, aus denen jeder Tor entnehmen kann, welchen Baustoff und welches Verfahren er jeweils und je nach der Lage jedes Falles zu wählen hat. Das wird auch künftig unmöglich bleiben schon allein deshalb, weil gleiche Baustoffe und anscheinend gleiche Verfahren zu mehr oder weniger guten, beziehungsweise schlechten Erfolgen führen, je nach der Hand und den Einflüssen, die bei ihrer Anwendung mitwirken. Weil ferner aber die Ansprüche an die Straßendecken und deren Beanspruchung sich dauernd verschieben und wandeln. Diese Dinge lassen sich nicht schematisch fassen, sondern Gott sei Dank wird auch künftig stets Klugheit, Einsicht und Geschick seine Bedeutung und seinen Wert behalten.

Mit anderen Worten: der Praktiker darf nicht erwarten, daß ihm die Wissenschaft, die Hochschule, weder die akademische Ausbildung und Lehre, noch die Mitarbeit von Professoren an praktischen Fragen, und in diesem Falle die Straßenbauforschungsstelle, alle Auskünfte verschafft, die ihn jeder eigenen Geistesarbeit entheben, wenn er eine Entscheidung zu treffen hat. Wir können ihm nur in gewissen Grenzen mit Hilfe, Rat und Anregungen beispringen und ihn dabei unterstützen, seine eigene Einsicht und Erfahrung durch Beobachtungen und Versuche zu mehren und zu stärken.

Gewiß können wir gewisse Erfahrungen sammeln, sie in leicht erfaßlicher Form zusammenstellen und gewisse Schlüsse aus den Beziehungen ableiten, die sich ergeben. Durch Erforschung gewisser Tatbestände gewisse Gesetze und Leitlinien ergründen und herausarbeiten. Darüber wird nachher noch näher zu sprechen sein. Vorab liegen die Verhältnisse im Straßenbau aber so, daß viele Baustoffe und Bauarten noch zu neu und undurchforscht sind, um die Beziehung zwischen ihren Eigenschaften und ihrer Bewährung unter den verschiedenen Verhältnissen in gesetzmäßiger Abhängigkeit darzustellen.

Solange demnach also die Praktiker aller Art unter eigener Verantwortung auf Grund eigener Erfahrung, eigener Beobachtungen und dadurch sachlich begründeter — nicht rein gefühlsmäßiger — Urteile zu handeln gezwungen sind, muß in ihrem Dienst das erste Streben der Straßenbauforschungsstelle darauf hinzielen, dem

Praktiker zu richtigen Beobachtungen und einwandfreien Erfahrungen zu verhelfen. Setzt man an diesem Punkte mit seinen Überlegungen an, so erkennt man zunächst, daß der Baufachmann stets unsicher in seinen Schlüssen bleiben muß, solange er nicht gewiß ist, ob er bei seinen Versuchen, die er an verschiedenen Stellen, unter verschiedenen Verhältnissen und zu verschiedenen Zeiten durchführt und wiederholt, stets mit gleichen Baustoffen arbeitet. Dessen ist er aber nie sicher, mag er auch von gleicher Firma gleiche Produkte beziehen. Und auch die Analysen, die die Firmen ihm liefern, geben ihm in vielen Fällen nach unserer Feststellung keine sichere Gewähr. Deshalb würde die Straßenbauforschungsstelle schon allein dadurch viel Gutes zu schaffen vermögen, wenn ihr dauernd die Baustoffe zugesandt würden und sie lediglich feststellte, ob und welche Abweichungen die einzelnen Lieferungen untereinander aufweisen. Damit gewinnt der Praktiker ein festes Fundament von großer Wichtigkeit.

Der nächste Schritt ist sodann der, daß Stücke aus dem fertigen Belag untersucht werden daraufhin, ob gleichartige Massen erzielt und ob bzw. inwieweit die Baustoffe durch den Einbau eine Veränderung durch Hitze und dergleichen erfahren haben.

Drittens aber wird sich dabei von selbst ergeben, daß die Untersuchungen darauf abzielen, kennzeichnende Unterschiede zwischen den verschiedenen Baustoffen gleicher, verwandter oder einander mehr oder weniger fernstehender Baustoffe zu ermitteln. Daraus gewinnt dann durch die Beobachtung der Bewährung und der im Gebrauch auftretenden Erscheinungen der Praktiker Anhaltspunkte, worauf besonders Wert zu legen ist, wenn dieser oder jener Effekt erzielt werden soll.

Das sind etwa die Aufgaben, die ich unter dem Begriff der „Baustoffkontrolle" zusammenfassen und die ich in Sonderstellung, wenn nicht gar in Gegensatz, zur „Baustoffprüfung" setzen möchte. Veranlaßt werde ich zu dieser schroffen Unterscheidung, die zunächst als Wortklauberei erscheinen könnte, durch die Erkenntnis der Notwendigkeit, die Prüfung mehr in den Hintergrund, die Kontrolle dagegen in den Vordergrund zu schieben, weil erstens die unter diese fallenden Aufgaben sonst zu kurz kommen und weil wir zweitens zu einer vollwertigen Prüfung noch nicht in der Lage sind. Arbeiten wir also trotzdem unter dieser Bezeichnung, so werden die Auftraggeber leicht enttäuscht, weil unsere Auskünfte ihre Erwartungen nicht erfüllen, und darunter müßte die Schätzung der Forschungsstellen und die Zusammenarbeit mit den Praktikern leiden.

Eine „Prüfung" stellt nämlich stets die Abgabe eines Werturteils in Aussicht. Dieses abzugeben ist man aber, wenn man gewissenhaft verfährt, nur in recht bechränktem Umfange in der Lage. Wir lehnen ein solches zwar, wo es gewünscht wird, nicht ab. Aber wir fassen es stets äußerst vorsichtig, stellen die Eigentümlichkeiten des betreffenden Baustoffes, die wir festzustellen in der Lage waren, in den Vordergrund, geben an, welche Folgerungen sich unserer Ansicht nach vermutlich bei der Verwendung und in der Straßendecke ergeben werden und stellen alles in allem unsere Beurteilung als rein persönliche Beratung dar. Irren wir uns, so wird das Vertrauen zu meiner Urteilsfähigkeit leiden. Das muß ich in Kauf nehmen.

Daraus ersieht man, daß wir keine Baustoffprüfung im gewohnten Sinne treiben. Wir können das nicht, weil wir noch ziemlich weit entfernt sind von

sicherer Kenntnis, wie sich die Eigenschaften der Stoffe in der Straße auswirken. Und auch in den Fällen, wo gewisse Normen für die Baustoffe aufgestellt sind, ist unsere Lage keine wesentlich gesichertere. Fraglos haben diese Normen einen beträchtlichen Wert als Mindestansprüche, denen „normale" Stoffe genügen sollen, und als Grundlage für eine gewisse Klassifizierung. Es ist aber noch durchaus nicht erwiesen, daß Stoffe mit — vielleicht sogar erheblich — abweichenden Eigenschaften nicht von gleichem oder gar höherem Wert sein mögen, besonders wenn sie für anormale Zwecke zur Verwendung kommen sollen.

Das sind Gründe genug, vorab weniger von der Prüfung zu reden und auf sie hinzuzielen und erst allmählich die Kontrolle dazu heranwachsen zu lassen.

Diese aber möchte ich dafür desto mehr in Gebrauch kommen sehen. Je mehr Baustoffe uns zu diesem Zweck zugehen, desto umfangreichere und lückenlosere Unterlagen erhalten wir, um zu beurteilen, was alles an Stoffen auf dem Markt ist, welche Verschiedenheiten und Mängel vorkommen und worin die Schwächen der Bautechnik liegen. Wir gewinnen zahllose und äußerst wertvolle Anregungen für die Forschung und gleichzeitig Richtlinien, deren Verfolgung uns den Bedürfnissen der Praxis nahe hält, ein zu weites Abirren in rein theoretische und zu „wissenschaftliche" Regionen aber verhindert. Denn diese Kontrolle — unter die auch die Prüfung in der von uns geübten Weise eigentlich fällt — bringt uns in viel nähere Fühlung und Gedankenaustausch mit den Praktikern, als es eine mehr schematische Prüfung (im engen Sinne) vermag, wie solche von Baustoffprüfämtern und Laboratorien sonst geübt wird.

Freilich bringt die Kontrolle, besonders das Forschen nach Unterschieden der Stoffe und ihrer Eigentümlichkeiten, eine große Menge von Arbeit mit sich. Die Masse der Aufträge kann, je mehr die Kontrolle in Aufnahme kommt, drückend werden, und jeder einzelne Fall erfordert mehr Leistung und Verantwortungsfreudigkeit, als die Prüfung nach Normen. Trotzdem führen wir diese Arbeit für Preise durch (durchschnittlich etwa 50 Mark je Fall), die bei weitem nicht unsere eigenen Kosten decken. Wir verfahren also wie ganz miserable Geschäftsleute, arbeiten unter Preis und liefern doch gute Ware, und setzen uns dem Vorwurf der Dummheit aus, weil wir es für so ungemein wichtig halten, die Kontrolle in weitester Verbreitung zur Aufnahme kommen zu sehen (hohe Kosten aber sind vorab die Bauämter zu tragen nicht bereit, weil sie den tieferen Wert dieser Verfahren noch nicht kennen) und weil — ich will es gestehen — ich diese Dummheit doch für klug halte. Denn sie macht sich zwar nicht unmittelbar bezahlt, wohl aber mittelbar, weil sie uns die Fülle an Materialien in die Hand spielt, uns in ständige Fühlung mit den Praktikern bringt und unseren Forschungsarbeiten Unterlagen und Richtung gibt.

Denn

2. Die Baustoff-Forschung.

bildet den zweiten Weg, den wir einzuschlagen haben im Streben nach dem Ziel des Dienstes am praktischen Straßenbau. Die Bezeichnung „Straßenbauforschungsstelle" läßt diese Aufgabe sogar besonders hervortreten. Und mit Recht! Die Auswertung der bei den Baustoffuntersuchungen sich ergebenden Befunde, ihre Zusammenstellung und alle die Fragen, deren Beantwortung die Praktiker draußen

wünschen und die in und bei uns selbst sich einstellen, führen unfehlbar auf das Gebiet der Forschung. Auf diesem Gebiete Leistungen zu erzielen, sind wir aber auch deshalb besonders und mit unentrinnbarem Zwang genötigt, weil wir dadurch uns Ruf und Ansehen erringen und die Mittel schaffen müssen, die wir bei den unter dem ersten Aufgabenkreis genannten Arbeiten zusetzen.

Das Feld für Forschungsarbeiten ist unendlich groß und meist noch jungfräulicher Urboden. Wer sich einen Begriff von der Fülle der Fragen machen will, die der Bearbeitung harren, sollte einmal das — noch lange nicht lückenlose — Programm lesen, in dem der Vorsitzende des Ausschusses für Teerstraßenbau der Stufa die dringendsten Forschungsaufgaben auf diesem Teilgebiet zusammenstellte. Es füllt in kurzen Stichworten, wenn ich nicht irre, 18 Schreibmaschinenseiten.

Auch hier ist unsere Forschungsstelle in intensivster Arbeit begriffen, um die Fragen zu klären, die im eigenen Betrieb auftreten, und recht große Aufträge zu erledigen, die uns von außen her gestellt sind. Darüber möchte ich mich hier nicht weiter verbreiten. Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, mit denen im Frühjahr 1929 begonnen wurde und deren vier weitere in Bearbeitung sind, dürften unsere Erfolge allen denen dartun, die dafür näheres Interesse haben.

3. Lehraufgaben.

Die Aufgaben auf dem Gebiete des Lehrens erwähne ich als letzte und auch nur mit wenigen Worten. Es ist ohne weiteres klar, wie wichtig der Betrieb der Forschungsstelle und die dabei gewonnenen Einblicke und Erkenntnisse für den Dozenten und seine Fachbeherrschung sind. Auch hier wieder scheint mir ein besonderer Wert des dem Lehrstuhl angegliederten Institutes darin zu liegen, daß es den Leiter in engste Fühlung mit der Praxis und deren Fragen unausweichlich hineinzwingt. Für die Studierenden aber bietet es die Gelegenheit, sich mit der Baustoffprüfung und deren Ergebnissen vertraut zu machen, und wer die hierfür einzurichtenden Kurse mitmacht, wird mit einem Rüstzeug in die Praxis hinaustreten, das ältere Jahrgänge schmerzlich entbehren. Damit wird auch der Boden bereitet, auf welchem künftig der Verkehr zwischen Praktikern und Forschungsstellen weit leichter und verständnisvoller erfolgen dürfte als es heute möglich ist.

Zum Schluß nur einige Zahlen:

	1927	1928
An Untersuchungsaufträgen waren zu erledigen:	56	183

Verausgabt waren bis 1. April 1929 für Einrichtung und Betrieb rund 100 000 Mark. Allen Stellen und Personen, die diese Mittel überwiesen und stifteten, sei auch an dieser Stelle unser Dank gesagt. Ich bin gewiß, daß unsere Arbeit und der Segen, der der deutschen Technischen Hochschule Danzig aus dem Institut erwachsen wird, den Beweis erbringen wird, daß diese hohen Beträge eine gute Kapitalsanlage bedeuten.

Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der Technischen Hochschule Danzig.

Von Regierungs- und Baurat Professor Dr.-Ing. Richard Winkel.

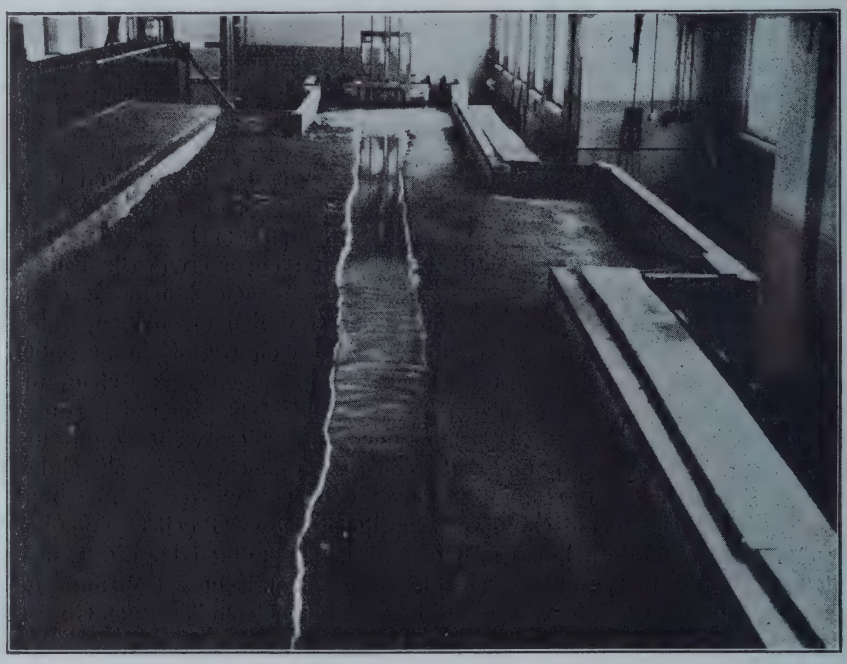
Der Wasserbau ist neben der Architektur wohl die älteste technische Ausführungsform, die Anfänge praktischer Wasserbaukunst reichen bis in das klassische Altertum zurück; Bewässerungs- und Stauanlagen waren schon im vorchristlichen Zeitalter im Euphrat- und Tigris-Gebiet wie auch in Ägypten bekannt, gewaltige, von hohen Steinbögen getragene Kanäle — Aquädukte — führten dem alten Rom Trink- und Gebrauchswasser zu, Ufermauern sicherten besiedeltes Land gegen die ununterbrochenen Wirkungen der Fluten, von der Küste aus weit in das Meer gebaute Wellenbrecher und Hafenmolen dienten der Schiffahrt als Schutzanlagen beim Auslaufen in die See und beim Wiederanlaufen der Küste. Die Flußbauten mit ihren Deichanlagen und Faschinenwerken sind ebenso wie die Binnenwasserstraßen mit ihren Stau- und Schleusenanlagen schon viele Jahrhunderte alt.

Es könnte daher dem Fernstehenden unverständlich erscheinen, daß sich für diese alte, bewährte Baukunst jetzt die Notwendigkeit ergibt, in besonderen Versuchsanstalten wissenschaftliche Forschungen anzustellen. Zahlreiche und hochbedeutsame Erfolge der in solchen Wasserbau-Versuchsanstalten ausgeführten Modellversuche haben aber in überzeugender Weise die Zweifel zerstreut, die anfänglich selbst von Wasserbauingenieuren dieser neuen, erst seit einigen Jahrzehnten aufgenommenen Forschung entgegengebracht wurden. Allerdings waren auch zunächst viele technisch-wissenschaftliche Schwierigkeiten zu überwinden, bevor dieses junge Unternehmen sich erfolgreich behaupten konnte; wie bei jeder technischen Betätigung mußte auch hier erst praktische Erfahrung gewonnen werden. Nachdem aber die wasserbauliche Versuchstechnik allgemein Beachtung gefunden hatte, war es auch für unsere Hochschule ein Gebot der Zeit, hier mit der fortschreitenden Wissenschaft Schritt zu halten, um auf diesem Gebiete nicht anderen Lehranstalten gegenüber in das Hintertreffen zu gelangen. Es kann erfreulicherweise an dieser Stelle festgestellt werden, daß die Wasserbau-Versuchsanstalt der Danziger Hochschule das Erwarten nicht getäuscht hat und bereits wertvolle, in der Fachwelt mit besonderer Beachtung aufgenommene Forschungsergebnisse aufzuweisen hat; ihre Daseinsberechtigung hat sie damit in unanfechtbarer Weise bewiesen.

Über das Versuchswesen zur Erforschung der Wasserbewegungen bestehen oft unzutreffende Vorstellungen. Für eine wissenschaftliche Forschung genügt nicht eine Darstellung der etwa zu erwartenden Verhältnisse an einem Vorführungsmodell. Dieses vermag wohl die Anschauung des Studierenden oder des werktätigen Ingenieurs zu beleben und anzuregen, aber Messungen ermöglicht es kaum oder nur unter sehr großen Vorbehalten. Die Versuchstechnik muß viel planmäßiger vorgehen, sie muß, auf theoretische Erkenntnisse und — ebenso wie jede Technik — auf weitgehende Praxis gestützt, schon vor der Errichtung eines Versuchs-

modells ermitteln, welches Maßstabverhältnis nach den Lehren der Ähnlichkeitsmechanik für den vorliegenden Zweck das geeignete ist, wie groß sich die Meßgenauigkeit dafür ergibt, welche Fehlerquellen störend wirken können, wie groß der Einfluß der Fehler auf die Messungsergebnisse ist und vieles andere mehr.

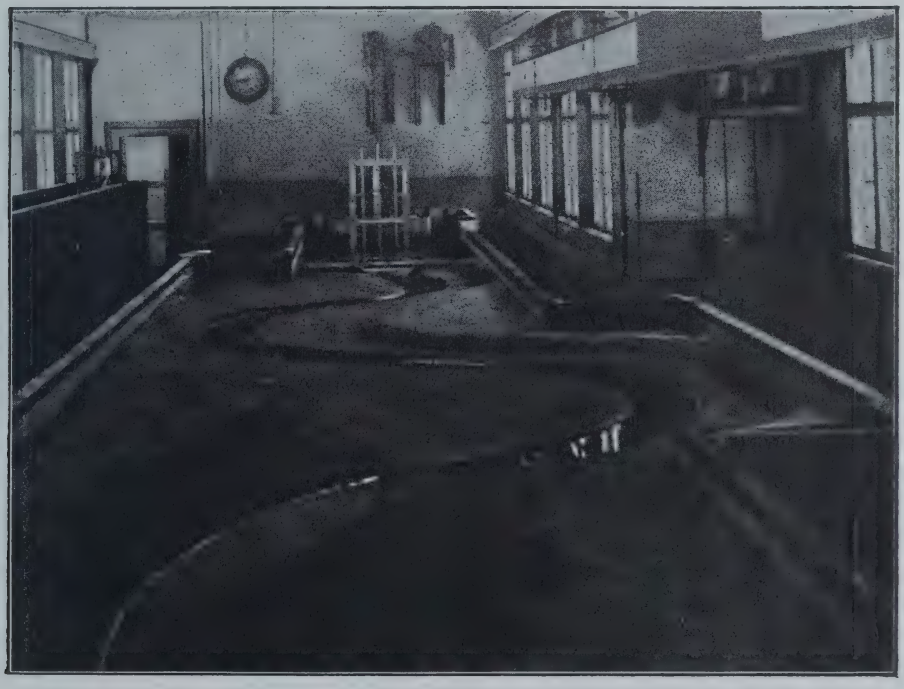
Für die Volkswirtschaft sind solche Forschungen von sehr großem Werte Jetzt, wo es gilt, überall zweckdienliche und zielsichere Aufbauarbeit zu leisten, ermöglichen erst sorgsam durchgeführte Untersuchungen in einer Versuchsanstalt



Flußbauversuche: Geradliniger Erdkanal bei beginnendem Uferangriff, der zum Anlaß einer Laufschlänglung wird

die schnelle und zuverlässige Ermittlung der zweckmäßigsten und zugleich billigsten Bauformen. Es sei als Beispiel auf die großzügigen wasserwirtschaftlichen Pläne zur Ausnutzung der in unseren Flüssen und Strömen noch unverwertet gebliebenen Wasserkräfte zur Erschließung der „weißen Kohle" hingewiesen. Hochwasser-Schutzanlagen im Quellgebiet der Wasserläufe sollen die landwirtschaftlichen Erträge sowie die menschlichen Siedlungen vor der verheerenden Gewalt ungebändigter Hochwasserfluten schützen; neue Wasserstraßen mit ihren gigantischen Kunstbauten: neue Wehranlagen, Schiffsschleusen, Düker und Überleitungen über Flüsse und Ströme oder Eisenbahnlinien als sogenannte Kanalbrücken; Ausbau und Erweiterungen der Häfen in Seestädten und im Binnenlande bringen eine Unmenge neu zu lösender technischer Probleme.

Einen besonders bemerkenswerten Erfolg hatten die für die neue Ymuidener See-Schleuse in der Staatl. Berliner Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau ausgeführten Untersuchungen; die Verwendung von neuartigen, aus den Forschungen erhaltenen Schützeinrichtungen machte die Anwendung der langen Kammerumläufe entbehrlich, die sich hieraus ergebenden baulichen Vereinfachungen brachten eine Ersparnis nach den Ermittlungen der Baubehörde von mehr als 2 Millionen holländische Gulden (das sind über 4 Millionen Danziger Gulden oder 3½ Millionen RM).



Starkgekrümmter Erdkanal, der durch ein nachfolgendes Hochwasser einen verwilderten Lauf erhält

Ebenso erbrachten auch andere Modellversuche den Beweis für den hohen wirtschaftlichen Wert dieser jungen Forschungswissenschaft.

Demnach wird es begreiflich, von welchem Werte es ist, daß unsere heranzubildenden Ingenieure während ihrer Studienzeit mit den Aufgaben und Methoden des wasserbaulichen Versuchswesens vertraut gemacht werden. Dieses Ziel kann aber nur durch eifrige Schulung erreicht werden, und deshalb ist für die Versuchsanstalt einer Hochschule der Lehrzweck die Hauptaufgabe.

Die Anstalt wurde in den Jahren 1924—25 durch Geheimrat Prof. Dr.-Ing. E. h. F. W. Otto Schulze erbaut und eingerichtet, nachdem vom Erbauer unserer Hochschule, Geheimrat Prof. Carsten, ein besonderes Gebäude dafür geschaffen worden war. Die weitere Entwicklung wurde von dem Verfasser übernommen.

Die planmäßig durchgeführten Übungen in der Versuchsanstalt werden von unseren Studierenden mit einem bemerkenswerten Eifer wahrgenommen. Außerdem bieten die Einrichtungen Fortgeschrittenen die Möglichkeit zur selbständigen, eigenen Arbeit; nicht selten ergeben sich aus solchen Sonderuntersuchungen für die Praxis sehr wertvolle Ergebnisse und wohl auch die Grundlagen für Promotionsarbeiten zur Erlangung des akademischen Grades eines Dr.-Ing. Der Hauptvorteil besteht aber darin, daß unsere jungen Ingenieure mit einem wissenschaftlichen

Flußreglung durch Buhneneinbauten

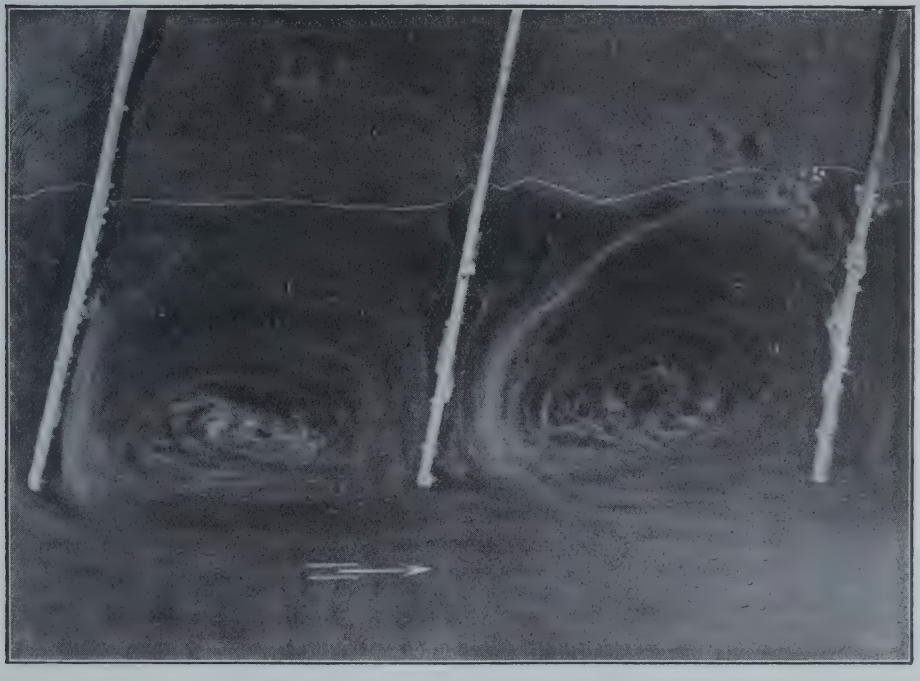
Rüstzeug in die Praxis hinausziehen, das sie befähigt, bei schwierigen Aufgaben aus dem Gebiete der angewandten Hydromechanik stets „sich des rechten Weges bewußt" zu bleiben. Das ist aber nicht zu unterschätzen, denn gerade auf diesem Gebiete kann ein Versäumnis oder eine Unterlassung der erforderlichen Vorarbeiten unter Umständen dazu führen, daß trotz eines übermäßigen Kostenaufwandes Bauwerke entstehen, die den Anforderungen denkbar schlecht genügen.

Die hier beigegebenen Abbildungen sollen keinen Anspruch darauf erheben, ein in sich abgeschlossenes Bild zu übermitteln, sie sind vielmehr in erster Linie dazu bestimmt, denjenigen Lesern eine Erinnerung an die Versuchsanstalt wach zu erhalten, die darin einmal selbst gearbeitet haben; für Fernstehende mögen sie indessen auch eine gewisse Vorstellung von einigen Einrichtungen der Danziger Versuchsanstalt übermitteln. Es erübrigt sich aus diesem Grunde eine eingehende Er-

klärung der Abbildungen im Texte, es mögen die den Abbildungen beigegebenen Unterschriften genügen.

Über die Betriebseinrichtungen selbst sei kurz folgendes mitgeteilt:

Das eigentliche Element der Wasserbauversuchsanstalt bildet naturgemäß das Wasser; dieses wird im Kreislaufe von zwei elektrisch angetriebenen Kreiselpumpen mit 200 und 50 Litern in der Sekunde Förderleistung zunächst in einen Hoch-

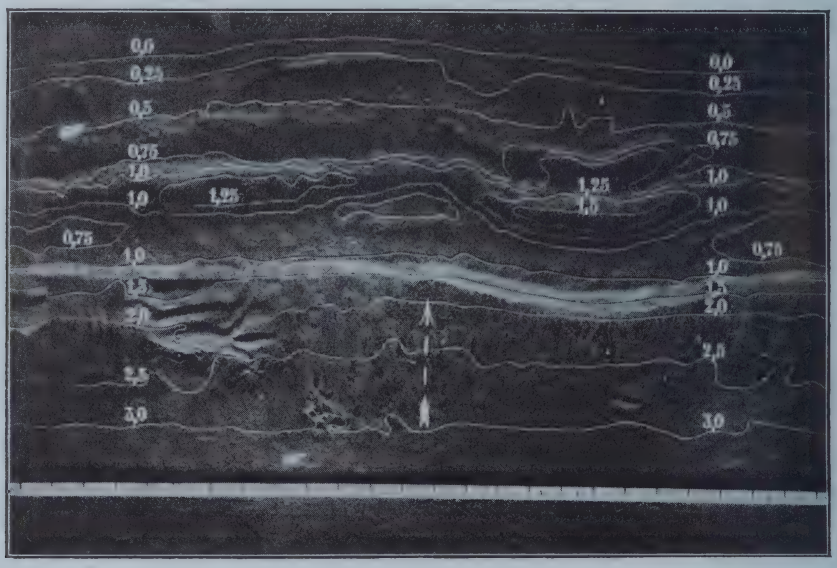


Strömungen in Buhnenfeldern

behälter, von dort in Rohrleitungen zu den Modellen entweder in der Flußbaurinne, in der hydraulischen Glaswandrinne oder in zwei kleineren Nebenrinnen geleitet, gelangt dann in den Rücklaufbehälter, der den Hauptteil des 39 m langen und 7 m breiten Hallenraumes kellerartig durchzieht, um vor der Rückkehr zu den Saugrohren der Kreiselpumpen noch über Meßüberfälle geleitet zu werden. Feinmeßinstrumente sind an allen erforderlichen Stellen aufgestellt, die zum Teil selbsttätig die Wasserstandshöhen und die Wassermengen aufschreiben. Besonderes Interesse verdient der am Ende der Flußrinne eingebaute Tideapparat zur Erzeugung der Flut- und Ebbebewegung in der Flußrinne, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Zur Herstellung der Modelle und der Meßeinrichtungen ist eine eigene Mechaniker- und Tischlerwerkstätte im Dachgeschoß der Anstalt mit elektrischem Betrieb eingerichtet worden. Neben der Werkstätte befindet sich noch ein großer Lagerraum

für Materialien und für Sand, der zum Einbau von Flußmodellen in der großen Flußrinne gebraucht wird. In dieser können die Wirkungen von Strombauten, Buhnen und dergleichen, sowie die Strömungen in Flußkrümmungen und in Stromübergängen studiert werden.

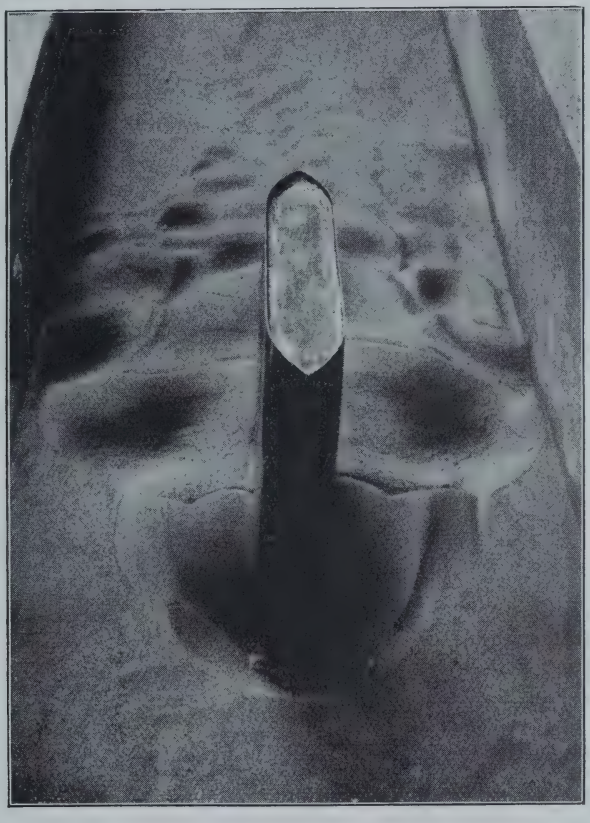
In der mit Glaswänden versehenen hydraulischen Rinne können zum Beispiel die Strömungsvorgänge an Wehren, Brückenpfeilern und anderen Bauteilen verfolgt werden. Auch die Wasserkraftanlagen werden dort untersucht; für sogenannte Hochdruck-Wasserkraftanlagen, die im Gebirge oft mit vielen hundert Metern Gefälle Verwendung finden, ist ein Sondermodell nebst einem, die Wasserschläge



Tiefenplan eines Meeresstrandes
nach Einwirkung auflaufender Brandungswellen.

dämpfenden Wasserschloß aufgestellt; an diesem Modell sind zahlreiche Meßvorrichtungen angebracht, die die Bestimmung von Leitungswiderständen und der jeweiligen Wasserdrücke sowie der bei Leistungsschwankungen auftretenden Druckschwingungen ermöglichen. Auch Instrumente zur Messung von Wassergeschwindigkeiten werden angewandt. Vor kurzem ist ein großes betriebsfähiges Modell einer neuzeitlichen Schiffsschleuse erbaut worden, das mit allen Meßeinrichtungen versehen wird, die zur Feststellung der dynamischen Beanspruchungen eines geschleusten Schiffes durch das einströmende bzw. abfließende Wasser nötig sind. Gleichzeitig werden die Schützbewegungen, die Änderungen des Wasserstandes in der Schleusenkammer selbsttätig von sinnreich konstruierten Apparaten als sogenannte Wegzeitlinien aufgezeichnet.

So wird auch hier stille, fleißige Arbeit geleistet, die draußen für die Bautechnik segensreich sich auswirkt.

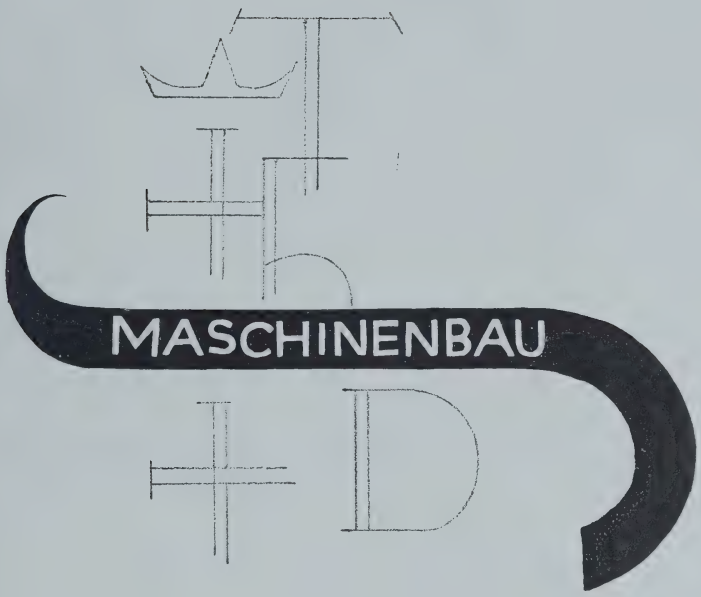


Kolkbildungen an einem Brückenpfeiler
(Blick stromab)

Kolkbildungen an einem Brückenpfeiler (Seitenansicht).

Veröffentlichungen der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Technischen Hochschule in Danzig.

1. Dr.-Ing. K. Beger, „Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Sand“, Dissertation 1924 und „Der Bauingenieur“ 1922, S. 680.
2. Dr.-Ing. B. Kressner, „Modellversuche über die Wirkungen der Brandungswellen und des Küstenstromes auf einen sandigen Meeresstrand und die zweckmäßige Anlage von Strandbuhnen“, Dissertation 1928 und „Die Bautechnik“ 1928, Heft 25.
3 Dr.-Ing. E. h. F. W. Otto Schulze, „Die Versuchsanstalt für Wasserbau an der Technischen Hochschule der Freien Stadt Danzig“, Die Wasserbaulaboratorien Europas, V.D.I.-Verlag Berlin 1926, S. 405—412.
4. Dr.-Ing. R. Winkel, „Experiments made in the laboratory at the Technical University in the Free City of Danzig“, Hydraulic Laboratory Practice, P. 568—576, New York 1929 (Published by The American Society of Mechanical Engineers).
5. Dr.-Ing. R. Winkel, „Die Buhnenwirkung“, „Die Bautechnik“ 1928, Heft 27, S. 395—397.
6. Dr.-Ing. R. Winkel, „Betrachtungen zur Abflußtheorie der Überfallwehre“, „Die Bautechnik“ 1928, Heft 49, S. 721—722.
7. Dipl.-Ing. Ch. Keutner, „Herleitung eines neuen Berechnungsverfahrens für den Abfluß an Wehren aus der Geschwindigkeitsverteilung des Wassers über der Wehrkrone“ (im Druck).


MASCHINENBAU

Leistungs- und Zugkraftkurven der Diesellokomotive

Von Prof. Dr.-Ing. Georg Mangold

Der Eisenbahnbetrieb erfordert, daß die Zugkraft der Lokomotive mit sinkender Fahrgeschwindigkeit in ganz erheblichem Maße zunimmt. Die Dampflokomotive wird diesen Erfordernissen gerecht. Sie stellt im wesentlichen eine Kraftanlage dar, deren größte Leistung bei der vorteilhaftesten oder Fahr-Geschwindigkeit vorhanden ist und bei der diese Leistung mit sinkender Geschwindigkeit bis zur Reibungsgeschwindigkeit v_r verhältnismäßig wenig abnimmt. Nach Strahl[1]) ist das Verhältnis der indizierten Grenzleistung L_i einer Dampflokomotive bei der Fahrgeschwindigkeit v zu der Höchstleistung L'_i bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit v' :

$$\frac{L_i}{L_{i'}} = 0{,}6 \left(2 - \frac{v}{v'}\right) \frac{v}{v'} + 0{,}4 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Die Zylinderzugkräfte Z_i ergeben sich dann mittels der Beziehung:

$$Z_i = \frac{270\ L_i}{v} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Nimmt man den mechanischen Wirkungsgrad der Übertragung vom Dampfzylinder auf den Treibradumfang als konstant an, so gelten die Beziehungen 1) und 2) auch für die Leistungen L_t am Treibradumfang. In

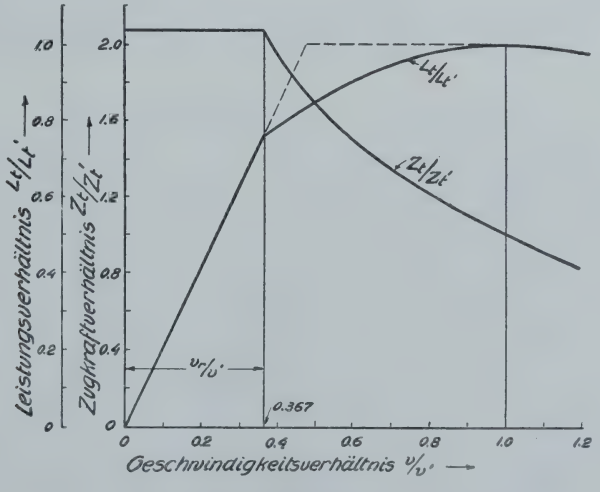


Abb. 1

sind das Leistungsdiagramm und das Zugkraftdiagramm einer Dampflokomotive, bezogen auf den Treibradumfang, graphisch dargestellt, wobei das Zugkraftverhält-

nis an der Reibungsgrenze der 2 C1 Einheits-Schnellzuglokomotive [2]) für einen Reibungskoeffizienten = 1/5 eingetragen ist.

Die klassische Dieselmaschine entspricht als mit den Treibachsen unmittelbar gekuppelte Antriebsmaschine für Lokomotiven nicht den Anforderungen des Eisenbahnbetriebes, da ihre Leistung sich ziemlich angenähert proportional ihrer Umdrehungszahl bzw. der Lokomotivgeschwindigkeit ändert. Um die Diesellokomotive diesen Anforderungen anzupassen, gibt es für die Kraftübertragung vom Dieselmotor auf die Treibräder eine Reihe von Möglichkeiten, die sich in folgende vier Gruppen zusammenfassen lassen:

1. Die mittelbare Kraftübertragung, und zwar auf elektrischem Wege, durch Zahnradgetriebe mit schaltbarer Übersetzung, durch Gase und Dämpfe und durch Füssigkeitsgetriebe [3]).
2. Die unmittelbare Kraftübertragung mit Aufladung der Dieselmaschine nach der Zunahme der Zugkraft [3]) und [4]).
3. Die mittelbare und unmittelbare Kraftübertragung [5]).
4. Die mittelbare und unmittelbare Kraftübertragung mit Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine nach der Zunahme der Zugkraft [6]).

Im folgenden sollen die Leistungs- und Zugkraftdiagramme dieser 4 Kraftübertragungsarten miteinander verglichen werden. Für die Wirtschaftlichkeit der Zugbeförderung und der Fahrplanbildung ist bei der Dampflokomotive die kleinste Geschwindigkeit an der Grenze der Kesselleistung und die größte an der Reibungsgrenze, d. i. die Reibungsgeschwindigkeit, maßgebend.

Soll deshalb eine Diesellokomotive in ihrer Leistungsfähigkeit einer Dampflokomotive gleichwertig sein, so müssen bei gleichen Höchstleistungen bei der vorteilhaftesten Fahrgeschwindigkeit der beiden Lokomotiven die Leistungen bzw. die Zugkräfte bei der Reibungsgeschwindigkeit mindestens gleich sein.

1. Die mittelbare Kraftübertragung

Von den Möglichkeiten der mittelbaren Kraftübertragung, die für Großlokomotiven in Betracht kommen, sind zwei praktisch ausgeführt und erprobt, das sind die elektrische Übertragung bei der von der Maschinenfabrik Esslingen erbauten Diesel-Elektrischen Lokomotive [7]) und die Zahnradübertragung mit schaltbarer Übersetzung bei der von der Hohenzollern A.-G., Düsseldorf, erbauten Diesel-Getriebelokomotive[8]). Eine Diesellokomotive mit Druckluftübertragung[9]) befindet sich bei der Maschinenfabrik Esslingen in Ausführung. Bei der Diesellokomotive mit mittelbarer Übertragung ergibt sich die Größe der indizierten Leistung des mittelbar übertragenden Dieselmotors aus der bei der Reibungsgeschwindigkeit erforderlichen Leistung bzw. Zugkraft am Treibradumfang und aus dem Übertragungswirkungsgrad bei dieser Geschwindigkeit von den Dieselzylindern auf die Treibräder. Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt die Reibungsverluste im Dieselmotor, den Leistungsbedarf der Hilfsmaschinen und die Verluste der mittelbaren Übertragung. Die Diesellokomotiven mit elektrischer und Druckluftübertragung ergeben mit dieser so bestimmten Leistung Zugkraftkurven, die denjenigen der Dampflokomotive ziemlich angenähert entsprechen.

2. Die unmittelbare Kraftübertragung mit Aufladung des Dieselmotors nach der Zunahme der Zugkraft

Die erste Diesellokomotive, die im Jahre 1911 von Klose-Sulzer-Borsig für die preußische Staatsbahn ausgeführt wurde, war ihrem Wesen nach eine Diesellokomotive mit unmittelbarer Übertragung und Aufladung nach der erforderlichen Zunahme der Zugkraft. Die Aufladung der Zweitakt-Dieselmaschine erfolgte durch Einführung einer größeren oder kleineren Menge verdichteter Luft in die Verbrennungszylinder am Ende des Verdichtungshubes. Das Anfahren geschah in der Weise, daß die Dieselzylinder bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 10 km/h mit Druckluft arbeiteten und dann auf Brennstoffbetrieb umgeschaltet wurden [10]). Einen dauernden Erfolg hatte diese erste Diesellokomotive nicht aufzuweisen. Nach der Indienststellung traten erhebliche Störungen auf, die zu einer dauernden Außerdienststellung führten. Weitere Vorschläge zur Verwirklichung der unmittelbar angetriebenen Diesellokomotive wurden von Seiliger gemacht. Bei dieser Lokomotive soll die Aufladung der Dieselmaschine durch Erhöhung des Druckes der Ansaug- oder Spül- und Ladeluft erfolgen. Um zu hohe Verdichtungsdrücke zu vermeiden, soll die Dieselmaschine mit veränderlichen Verdichtungsräumen versehen werden. Ein Vorschlag, der kaum praktische Bedeutung haben dürfte. Das Anfahren soll auch hier dadurch erfolgen, daß alle oder nur einige Dieselzylinder mit Druckluft betrieben werden und bei einer bestimmten Lokomotivgeschwindigkeit die Umstellung auf Brennstoffbetrieb erfolgt. Zur Erzeugung der vorverdichteten Ansaug- oder Spül- oder Ladeluft ist ein Hilfsmotor vorhanden, der auch die erforderliche Druckluft für das Anfahren liefert [11]).

Die Größe der Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine ergibt sich aus dem Leistungsdiagramm bezogen auf den Treibradumfang. In

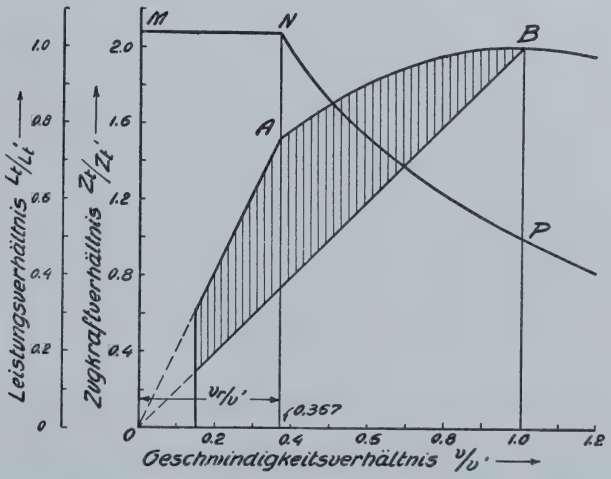


Abb. 2

ist OAB die Leistungskurve der Dampflokomotive, wie sie etwa der 2C1 Einheits-Schnellzuglokomotive entspricht. Bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit hat die Lokomotive ihren besten Gesamtwirkungsgrad, und die Dieselmaschine arbeitet deshalb ohne Aufladung. Durch die Leistung bei dieser Geschwindigkeit liegen ihre Abmessungen fest, so daß die Gerade OB die Leistungskurve der unaufgeladenen Dieselmaschine unter Annahme eines konstanten mechanischen Wirkungsgrades darstellt. Soll die Diesellokomotive dieselben Zugkräfte wie die Dampflokomotive ausüben, so ergibt sich aus der erforderlichen Zugkraft bei der Reibungsgeschwindigkeit die Aufladung der Dieselmaschine zu 110 %. Die vertikalen Strecken zwischen OAB und OB stellen die Leistungen, die der Aufladung der Dieselmaschine entsprechen, dar. Sie ist demnach bei der Reibungsgeschwindigkeit am größten und nimmt auf Null bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit ab. Die Zugkraftkurve der Dampflokomotive und der Diesellokomotive mit 110 % Aufladung ist durch MNP dargestellt.

Die Größe der Hilfsdieselmaschine zum Anfahren ergibt sich aus der erforderlichen Zugkraft und Geschwindigkeit, bei welcher die Zündung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine mit Sicherheit einsetzt. Es kann angenommen werden, daß dieselbe bei einer Umdrehungszahl von 45 Uml/min. sicher zündet. Bei der 2C1 Einheits-Dampflokomotive mit 2 m Treibraddurchmesser und 110 km/h vorteilhaftester Geschwindigkeit entspricht diese Umdrehungszahl etwa 15 % der vorteilhaftesten Geschwindigkeit, so daß sich die Anfahrleistung am Treibrad zu $0{,}15 \cdot 2{,}07 = 0{,}31$ der Höchstleistung der Lokomotive ergibt. Der Übertragungswirkungsgrad von der Welle der Hilfsdieselmaschine auf die Treibräder beträgt selbst bei Vorerwärmung der Druckluft durch die Auspuffgase höchstens 0,6, da die Füllung der als Druckluftzylinder arbeitenden Dieselzylinder sehr groß sein muß. Damit ergibt sich die Leistung der Hilfsdieselmaschine zu 51 % der Höchstleistung der Lokomotive. Von der Hilfsdieselmaschine werden außer dem Aufladegebläse noch die anderen Hilfsmaschinen angetrieben, d. s. die Ventilatoren für den Wasser- und Ölkühler und, bei Verwendung einer im Zweitakt arbeitenden unmittelbar übertragenden Dieselmaschine, die Spülpumpe. Der Antrieb eines Einblaseluftverdichters kommt nicht in Betracht, da für die Lokomotive zweckmäßigerweise kompressorlose Maschinen verwendet werden. Demgemäß beträgt die Belastung der Hilfsdieselmaschine bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit höchstens $\frac{1}{5}$ ihrer Höchstleistung. Hieraus ergibt sich somit, daß bei Diesellokomotiven mit unmittelbar übertragender Dieselmaschine auf der Lokomotive Hilfsdieselmaschinen mit großer Leistung untergebracht werden müssen, die bei der Höchstleistung der Lokomotive nur ganz schwach belastet sind. Bei dieser Art der Diesellokomotive muß also ein großes totes Gewicht geschleppt werden. Sie wird dadurch sehr schwer und teuer in der Ausführung. Außerdem wird durch die geringe Belastung der Hilfsdieselmaschine der Gesamtwirkungsgrad verschlechtert.

3. Die mittelbare und unmittelbare Kraftübertragung

In der deutschen Patentschrift Nr. 304 839 aus dem Jahre 1914 wird eine Brennkraftlokomotive vorgeschlagen, die mehrere selbständige Antriebsmotoren besitzt, von denen die Hauptmotoren unmittelbar mit den Treibachsen gekuppelt

sind und die Nebenmotoren ihre Leistung in irgendeiner mittelbaren Übertragungsform auf die Treibachsen oder besondere Lauf- oder Drehgestellachsen übertragen. Die Lokomotive fährt mit den Dieselmotoren für die mittelbare Übertragung an. Bei einer bestimmten Lokomotivgeschwindigkeit wird die Zündung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine eingeschaltet, so daß von dieser ab die Kraftübertragung mittelbar und unmittelbar erfolgt. Durch die Unterteilung der Übertragung der Leistung in mittelbar und unmittelbar wird ein sicheres Anfahren der Lokomotive erzielt. Der Antrieb der Hilfsmaschinen erfolgt zweckmäßigerweise von der Dieselmaschine für die mittelbare Übertragung. Die untere Grenze der mittelbaren Übertragung ist durch das Anfahren der Lokomotive gegeben. Bezogen auf die Höchstleistung, beträgt die Leistung am Treibradumfang der 2C1 Einheits-Schnellzug-Dampflokomotive bei 15 % der vorteilhaftesten Geschwindigkeit das 0,31fache. Damit liegt für die Diesellokomotive die Größe der kleinsten mittelbaren Übertragung fest. Die Größe der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine ergibt sich aus der erforderlichen Gesamtleistung bei der Reibungsgeschwindigkeit. In

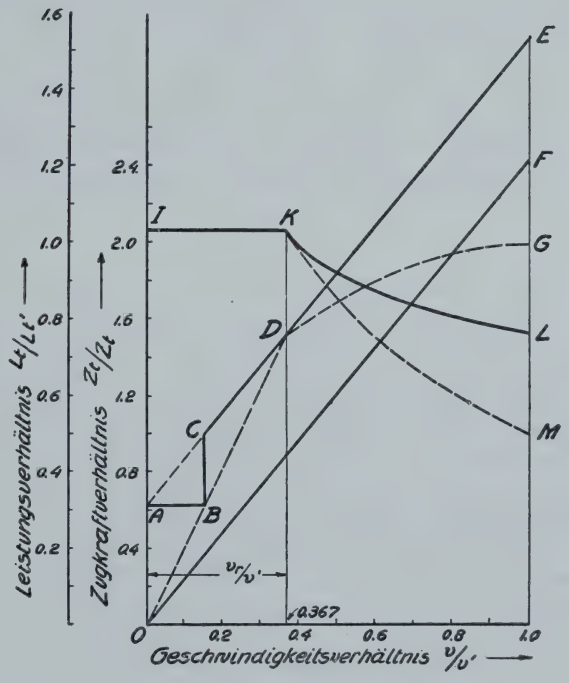


Abb. 3

ist ABCDE die Leistungskurve der mittelbar und unmittelbar übertragenden Diesellokomotive. Die Leistung der unmittelbaren Übertragung allein ist durch die Gerade OF dargestellt. Bei der mittelbaren Übertragung ist angenommen, daß der

Übertragungswirkungsgrad unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Je nach der Veränderlichkeit dieses Übertragungswirkungsgrades mit der Geschwindigkeit, die von der Übertragungsart abhängt, wird die mittelbar übertragene Leistung bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit größer oder kleiner als der eingezeichnete Wert. Zum Vergleich ist die Leistungskurve ODG der Einheits-Schnellzug-Dampflokomotive eingezeichnet. Die entsprechenden Zugkraftkurven sind IKL für die Diesel- und IKM für die Dampflokomotive. Aus dem Vergleich der Leistungskurven der beiden Lokomotiven folgt, daß bei der Diesellokomotive die Höchstleistung beträchtlich höher als bei der Dampflokomotive sein muß, um bei der Reibungsgeschwindigkeit die gleiche Leistung bzw. Zugkraft wie bei der Dampflokomotive ausüben zu können, und zwar ist sie um so größer, je kleiner die mittelbare Übertragung ist. Die Zugkraft bei der Reibungsgeschwindigkeit ist bestimmend für das zu ziehende Wagengewicht. Demnach kann diese Diesellokomotive bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit ihre Leistung nicht voll ausnutzen. Die Dieselmaschinen müssen bei derselben mit kleinerer Belastung als der der Vollast entsprechenden arbeiten. Bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit muß sie deshalb ein großes totes Gewicht schleppen. Damit wird das Lokomotivgewicht groß, die Herstellung teuer und der Gesamtwirkungsgrad verschlechtert.

4. Die mittelbare und unmittelbare Kraftübertragung mit Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine nach der Zunahme der Zugkraft

Bei dieser Art der Diesellokomotive sind mehrere voneinander unabhängige Dieselmaschinen vorhanden, von denen die einen ihre Leistung unmittelbar auf die Lokomotivtreibräder übertragen, während bei den anderen die Übertragung auf irgendeine mittelbare Weise erfolgt und bei welcher die unmittelbar übertragenden Dieselmaschinen nach der Zunahme der Zugkraft aufgeladen werden. Die Aufladung erfolgt durch Erhöhung des Druckes der Ansaug- oder Spül- und Ladeluft. Das Anfahren der Lokomotive wird mittels der mittelbar übertragenden Dieselmaschinen vorgenommen. Bei einer bestimmten Lokomotivgeschwindigkeit wird die Zündung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschinen eingeschaltet, so daß von derselben ab die Übertragung unmittelbar und mittelbar erfolgt. Das Spül- und Ladergebläse sowie die sonstigen Hilfsmaschinen werden von den mittelbar übertragenden Dieselmaschinen angetrieben. Bevor bei dieser Lokomotive die Größe der mittelbaren Übertragung festgelegt werden kann, ist erst die Frage zu klären, in welcher Weise die Größe der prozentualen Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine von der Größe der Unterteilung in mittelbare und unmittelbare Übertragung abhängig ist, da die Aufladung der Dieselmaschine beschränkt ist. Bei gleicher Veränderung des Zugkraftverhältnisses mit dem Geschwindigkeitsverhältnis sowohl für die Gesamtzugkraft der Lokomotive als auch für die Zugkraft, die mittelbar übertragen wird, ergibt sich, daß die Größe der prozentualen Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine unabhängig von der Größe der Unter-

teilung in unmittelbare und mittelbare Übertragung ist. Der Verlauf der Zugkraftkurve der mittelbaren Übertragung hängt von der Art der Übertragung ab. Abweichungen dieser Veränderungen der Zugkraftverhältnisse haben Zunahme bzw. Abnahme der prozentualen Aufladung bei der Unterteilung zur Folge. Es können jedoch die Abweichungen der beiden Kurven für die in Betracht kommenden Übertragungsarten als klein angenommen werden. Aus der Unabhängigkeit der Aufladung von der Unterteilung und der Tatsache, daß die mittelbare Übertragung schwerer als die unmittelbare ist, ergibt sich, daß die mittelbare Übertragung auf die Größe zu verkleinern ist, die durch die Anfahrbedingungen gegeben ist.

Es sei wiederum das Zugkraft- und Leistungs-Diagramm der 2C1 Einheits-Schnellzug-Lokomotive zugrunde gelegt. Danach ist der Leistungsbedarf am Treibradumfang bei einer Geschwindigkeit von 15 % der vorteilhaftesten Geschwindigkeit das 0,31fache der Höchstleistung, womit die Größe der mittelbaren Übertragung festliegt. Aus der erforderlichen Höchstleistung bei der vorteilhaftesten Geschwindigkeit und der bei dieser Geschwindigkeit vorhandenen Größe der mittelbaren Übertragung ergibt sich die Größe der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine. Ihre größte Aufladung folgt aus der notwendigen Leistung bei der Reibungsgeschwindigkeit und der bei dieser Geschwindigkeit vorhandenen Größe der mittelbaren Übertragung. In den nachstehenden Betrachtungen sind der mechanische Wirkungsgrad der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine und der Übertragungswirkungsgrad $\eta_{ü}$ der mittelbaren Leistung von der Welle der Dieselmaschine auf die Treibräder bei allen Geschwindigkeiten als konstant angenommen. Es ist:

$$(L_t)_v = (L_u)_v + \left(L_m - (L_k)_v\right) \cdot \eta_{ü} \quad \ldots \quad 3)$$

und:

$$(L_t)_r = \varphi \cdot (L_u)_r + \left(L_m - (L_k)_r\right) \cdot \eta_{ü} \quad \ldots \quad 4)$$

Dabei ist:

$(L_t)_v$ bzw. $(L_t)_r$ — die erforderliche Leistung bei der vorteilhaftesten bzw. der Reibungsgeschwindigkeit am Treibradumfang,

$(L_u)_v$ bez. $(L_u)_r$ — die Leistung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine ohne Aufladung bei der vorteilhaftesten bez. der Reibungsgeschwindigkeit am Treibradumfang,

φ — ein Koeffizient, der das Verhältnis der Leistungen der aufgeladenen zur nicht aufgeladenen Dieselmaschine bei der Reibungsgeschwindigkeit angibt,

L_m — die Leistung der mittelbar übertragenden Dieselmaschine an ihrer Kurbelwelle,

$(L_k)_v$ bez. $(L_k)_r$ — der Leistungsbedarf des Gebläses für die Spülung bez. für die Erhöhung des Ansaug-, Spül- oder Ladedruckes bei der vorteilhaftesten bez. der Reibungsgeschwindigkeit.

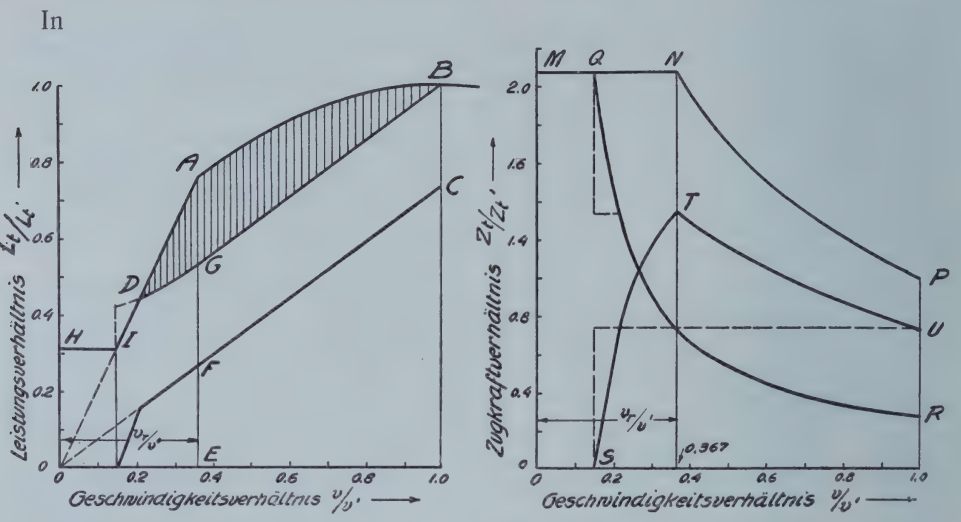


Abb. 4 und 5

sind HJAB die Leistungskurve und MNP die Zugkraftkurve dieser Diesellokomotive, die mit derjenigen der 2C1 Einheits-Schnellzug-Dampflokomotive vollständig übereinstimmen. Die Gerade OC stellte die Leistung L_u der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine ohne Aufladung dar. Die zwischen HIDGB und der Geraden OC liegenden senkrechten Strecken geben die mittelbar übertragenen Leistungen an. Ferner entsprechen die zwischen DAB und DGB liegenden senkrechten Strecken der Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine. Die größte Aufladung tritt bei der Reibungsgeschwindigkeit auf und beträgt in dem vorliegenden Beispiel dem Verhältnis der Strecken AG : FE entsprechend 85 %. QR ist die Zugkraftkurve der mittelbaren und STU der unmittelbaren Übertragung. Der Berechnung des Leistungsdiagramms ist eine doppelt wirkende Zweitakt-Dieselmaschine mit Aufladung durch Auspuffdrosselung zugrunde gelegt. Als Spül- und Aufladegebläse sind Turbogebläse vorgesehen, die von der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine angetrieben werden, und zwar sind bei der Reibungsgeschwindigkeit 0,217 P.S. Leistung pro P.S. der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine am Treibrad als Spül- und Aufladeleistung und bei der vorteilhaftesten oder Fahrgeschwindigkeit 0,07 P.S. pro P.S. am Treibrad für die Antriebsleistung der Spülpumpe zugrunde gelegt. Bei einer Dieselmaschine mit Aufladung durch Erhöhung des Ansaug-, Spül- und Ladedruckes steigt bei gleichem Verdichtungsverhältnis der Verdichtungsenddruck annähernd proportional dem Ansaug-, Spül- und Ladedruck. Um zu große Höchstdrücke zu vermeiden, setzt man den Verdichtungsenddruck der unaufgeladenen Maschine auf ungefähr 20 at herab. Durch diese Maßnahme wird der Brennstoffverbrauch der Maschine unwesentlich verschlechtert, da die Wärmeverluste an das Kühlwasser abnehmen und der mechanische Wirkungsgrad zunimmt. Um jedoch die notwendige Zündtemperatur bei dem kleinen Ver-

dichtungsverhältnis zu erreichen, muß die Ansaug-, Spül- und Ladeluft entsprechend vorgewärmt werden. Die Vorwärmtemperatur ergibt sich für die gleiche Verdichtungsendtemperatur und den gleichen Verdichtungsenddruck bei Aufladung aus der Beziehung:

$$\frac{T_a'}{T_a} = \left(\frac{p_a'}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Dabei ist:

p_a, T_a — der Druck bzw. die absolute Temperatur der Ansaug-, Spül- und Ladeluft der normalen Dieselmaschine,

p_a', T_a' — der Druck bzw. die absolute Temperatur der Ansaug-, Spül- und Ladeluft mit vergrößertem Verdichtungsraum und Aufladung,

k — ist der Exponent der Verdichtungslinie, der als konstant angenommen ist.

Die Vorwärmung der Ansaug-, Spül- und Ladeluft der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine erfolgt durch die Abgase der mittelbar übertragenden Dieselmaschine. Da diese Maschine bei jeder Lokomotivgeschwindigkeit voll belastet im Betrieb ist, so steht für die Vorwärmung bei allen Betriebsfällen genügende Wärme zur Verfügung.

Die Diesellokomotive mit unmittelbarer und mittelbarer Übertragung und Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine nach der erforderlichen Zugkraft hat gegenüber der Diesellokomotive mit nur unmittelbarer Übertragung und Anfahrvorrichtung und gegenüber der Diesellokomotive mit unmittelbarer und mittelbarer Übertragung den Hauptvorteil, daß bei vorteilhaftester oder Fahrgeschwindigkeit sämtliche auf der Lokomotive untergebrachten Dieselmaschinen voll belastet sind. Außerdem kann bei ihr die mittelbar übertragende Dieselmaschine auf die Größe verringert werden, welche den Anfahrbedingungen entspricht. Aus diesen beiden Tatsachen ergibt sich für diese Art von Diesellokomotiven ein erheblich kleineres Lokomotivgewicht, als bei den Diesellokomotiven nach 2 und 3. Ebenso ergibt sich ein günstiger Gesamtwirkungsgrad, da der größte Teil der Lokomotivleistung auf unmittelbarem Weg übertragen wird. Auch gegenüber der Diesellokomotive mit nur mittelbarer Übertragung hat diese Diesellokomotive ein kleineres Gewicht und günstigeren Gesamtwirkungsgrad, da die mittelbare Übertragung immer schwerer als die unmittelbare ist und einen schlechteren Gesamtwirkungsgrad aufweist.

Zusammenfassung

Es werden die Leistungs- und Zugkraftdiagramme verschiedener Diesellokomotiven dargestellt, und festgestellt, daß die Diesellokomotive mit unmittelbarer und mittelbarer Übertragung und Aufladung der unmittelbar übertragenden Dieselmaschine das kleinste Lokomotivgewicht bei günstigem Gesamtwirkungsgrad ergeben muß.

Anmerkungen

1) Strahl: Verfahren zur Bestimmung der Belastungsgrenzen der Dampflokomotiven. Z.d.V.d.I. 1913.

2) Z.d.V.d.I. 1926, Seite 1725 ff.

3) Siehe: „De Ingenieur" vom 20. 11. 26 „Der heutige Stand des Diesellokomotivbaues" von Dr.-Ing. H. Brown.

4) Eisenbahnwesen 1925.

5) D.R.P. 304 838 vom 8. 3. 1914 von Dr.-Ing. Kreglewski.

6) Patentanmeldung M 94 552 vom 3. 5. 1926 des Verfassers.

7) Lomonossoff: „Die Diesel-Elektrische Lokomotive" 1924.

8) Z.d.V.d.I. 1927, Seite 873 ff.

9) Dieselmaschinen II, V.d.I.-Verlag 1926, Seite 46.

10) Sternenberg: „Die erste Thermolokomotive". Z.d.V.d.I. 1913.

11) Eisenbahnwesen 1925.

Der Wasserumlauf in Steilrohrkesseln[1])

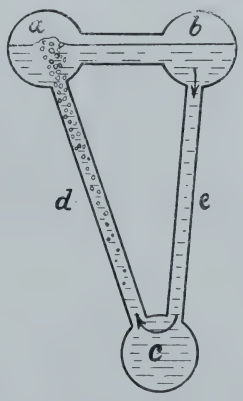
Von Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmidt

Einleitung

Der Umlauf des Wassers in Wasserrohrkesseln ist für den störungsfreien Betrieb einer Kesselanlage von großer Bedeutung. Das Wasser führt die gebildeten Dampfblasen fort und verhindert örtliche Überhitzungen, die zu Ausbeulungen oder zum Platzen von Rohren führen können. Der Wasserumlauf gleicht weiter Temperaturunterschiede aus, sodaß Wärmespannungen und ihre Folgen, wie Überanstrengung des Materials, Lecken der Einwalzstellen und Nietnähte verhindert werden.

Die Wasserbewegung wird hervorgerufen durch den Gewichtsunterschied von Wasser verschiedener Temperatur und durch die Entwicklung von Dampfblasen, die einen Auftrieb verursachen. Die Gewichtsunterschiede warmen und kalten Wassers spielen bei Dampfkesseln nur während des Anheizvorganges eine Rolle, nach Einsetzen der Dampfentwicklung können sie gegen die von den Dampfblasen hervorgerufenen Umtriebskräfte vernachlässigt werden.

Wir wollen uns hier nur mit dem letzteren Fall beschäftigen, wo der Wasserumlauf allein durch die Dampfbildung aufrechterhalten wird. In Abbildung 1 ist



Schema eines Steilrohrkessels

Abb. 1

ein Steilrohrkessel schematisch dargestellt, bestehend aus den beiden durch ein weites Rohr verbundenen Oberkesseln a und b, dem Unterkessel c, dem Steigrohrbündel d und dem Fallrohrbündel e. Von diesen beiden Rohrbündeln ist jeweils

nur ein Rohr in übertriebener Dicke eingezeichnet. Das Steigrohrbündel ist den heißesten Flammgasen und der Strahlung des Feuerbettes ausgesetzt, es hat daher starke Dampfentwicklung, so daß ein Umlauf des Wassers in der durch Pfeile bezeichneten Richtung zu erwarten ist.

Eine Theorie des Wasserumlaufes in solchen Steilrohrkesseln ist von Münzinger[2]) unter gewissen vereinfachenden Annahmen aufgestellt worden. Er vernachlässigt dabei:

1. die Selbstverdampfung, die in einer aufsteigenden Wassersäule von Sättigungstemperatur stattfindet, auch wenn von außen keine Wärme zugeführt wird,
2. die Relativgeschwindigkeit der Dampfblasen gegen das Wasser.

Diese Vernachlässigungen sind sehr weitgehend, denn die Relativgeschwindigkeit des Dampfes gegen das Wasser ist, wie unsere unten behandelten Versuche zeigen, mit 1 bis 2 m/sec von gleicher Größenordnung, wie die bei ausgeführten Dampfkesseln auftretende Strömungsgeschwindigkeit des Wassers bei Eintritt in die Steigrohre, und die Selbstverdampfung kann unter Umständen ein Mehrfaches der Dampfbildung an der Wand betragen.

Im folgenden sollen die Grundlagen einer Theorie des Wasserumlaufes ohne diese Vernachlässigungen entwickelt und Versuche mitgeteilt werden, die die notwendigen empirischen Unterlagen der neuen Theorie bilden.

Die Dampfbildung in senkrechten Steigrohren

In dem aufsteigenden Wasserstrom des Steigrohres eines Kessels, das wir uns der Einfachheit halber senkrecht vorstellen, entsteht Dampf durch Wärmezufuhr von außen und durch Selbstverdampfung. Die Verdampfung durch äußere Wärmezufuhr erfolgt an der Rohrwand. Die Selbstverdampfung hat ihre Ursache in der Abnahme des hydrostatischen Druckes der aufsteigenden Wassersäule, wodurch ein Teil des Wassers verdampft. Diese Verdampfung vollzieht sich auch im Innern der Flüssigkeitsmasse und erfolgt ohne äußere Wärmezufuhr auf Kosten des Wärmeinhaltes der Flüssigkeit.

Wir bezeichnen mit

L_a	die Dampferzeugung an der Rohrwand durch äußere Wärmezufuhr in kg/sec,
L_i	die Selbstverdampfung in kg/sec,
$L = L_a + L_i$	die gesamte Dampferzeugung des Rohres in kg/sec,
x	die Entfernung vom unteren Rohrende in m,
d	den inneren Rohrdurchmesser in m,
$f = \frac{d^2\pi}{4}$	den lichten Rohrquerschnitt in m².

Die Dampferzeugung durch äußere Wärmezufuhr in einem Stück des Rohres von der Länge dx ist dann

$$d\,L_a = f\,D\,d\,x \tag{1}$$

wenn wir mit

D die sekundliche Dampferzeugung durch äußere Wärmezufuhr in 1 m³ Rohrvolumen bezeichnen. Die Größe D, die man auch als äußere Verdampfungsdichte bezeichnen kann, ergibt sich aus der sonst gewöhnlich angegebenen Heizflächenbelastung M in kg je h und m² Heizfläche nach der Formel

$$D = \frac{M}{3600} \cdot \frac{\text{Rohroberfläche}}{\text{Rohrvolumen}} = \frac{M}{900\,d} \tag{2}$$

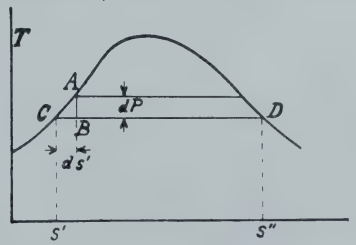
Die Heizflächenbelastung, die der Einfachheit halber auf die innere Rohroberfläche bezogen sei, liegt im Mittel über die ganze Heizfläche, bei Steilrohrkesseln meist zwischen 30 und 60 kg/h m², kann aber in den ersten Rohrreihen bis auf das Zehnfache dieser Werte steigen. Um den zahlenmäßigen Zusammenhang zu übersehen, ist in Tabelle 1 für ein Rohr von 10 cm Innendurchmesser und für eine Anzahl von Heizflächenbelastungen M, die äußere Verdampfungsdichte D und die in 1 m Rohr erzeugte Dampfmenge L_a/m ausgerechnet.

Tabelle 1.

Zusammenhang zwischen Heizflächenbelastung M, Verdampfungsdichte D und Dampferzeugung L_a/m im Rohr von 10 cm Innendurchmesser.

M	27	36	45	54	90	180	360	540	900	kg/h m²
D	0,3	0,4	0,5	0,6	1	2	4	6	10	kg/sec m³
L_a/m	2,36	3,14	3,93	4,71	7,85	15,7	31,4	47,1	78,5	g/sec m

Der Betrag der Selbstverdampfung läßt sich mit Hilfe eines Entropie-Diagramms oder an Hand von Dampftabellen ermitteln. Tritt in das untere Rohrende Wasser von Sättigungsdruck und -temperatur ein, so erfährt es beim Aufsteigen eine Drucksenkung unter den Sättigungsdruck, die einen Teil verdampfen läßt.



Entropiediagramm zur Ermittlung der Selbstverdampfung in einer aufsteigenden Wassersäule

Abb. 2

Bezeichnen wir mit

$d\xi$ den verdampften Bruchteil,

dP die Druckänderung in kg/m²,

so ist die Zustandsänderung des Wassers beim Durchströmen des Steigrohres durch die Strecke AB des T,s-Diagramms der Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist

$$d\xi = \frac{ds'}{s'' - s'} = \frac{CB}{CD},$$

und als Maß für die Selbstverdampfung bei Druckänderung um dP kann man die Größe

$$c = \frac{d\xi}{-dP} = \frac{1}{s'' - s'} \frac{ds'}{dP}$$

benutzen, die wir als Konstante der Selbstverdampfung bezeichnen wollen. Diese Konstante hat die Dimension m²/kg und ist in Tabelle 2 in Abhängigkeit vom Sättigungsdruck p_s in at angegeben.

Tabelle 2.

Konstante der Selbstverdampfung $c = \frac{1}{s'' - s'} \frac{ds'}{dP}$ in Abhängigkeit vom Sättigungsdruck p_s

p_s	1,0	1,5	2	3	5	10	20	30	40	50	75	100	150	at
$c \cdot 10^8$	516	382	305	225	153	96	60	47	40	36	30	30	35	m²/kg

Lassen wir z. B. in ein senkrechtes Siederohr von d = 10 cm Innendurchmesser von unten Wasser bei 10 at, der zugehörigen Sättigungstemperatur von 179° und dem spezifischen Gewicht $\gamma_w = 890$ kg/m³ mit der Geschwindigkeit w = 2 m/sec eintreten, so strömt im ganzen das Gewicht

$$G = w \frac{d^2\pi}{4} \gamma_w = 14 \text{ kg/sec}$$

durch das Rohr. Beim Aufsteigen um 1 m erfährt das Wasser eine Druckverminderung $\triangle P$ um 1 m $\cdot \gamma_w = 890$ kg/m², wobei die Menge

$$G\, c\, \triangle P = 14 \cdot 96 \cdot 10^{-8} \cdot 890 \cdot \text{kg/sec m} = 12 \text{ g/sec m}$$

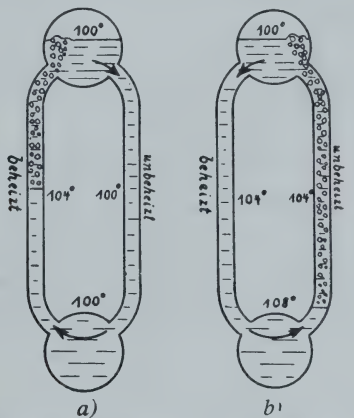
verdampft.

Vergleicht man diesen Betrag mit der Dampferzeugung L_a durch Wärmezufuhr von außen in 1 m Rohrlänge an Hand der Tabelle 1, so erkennt man, daß erst bei der hohen Heizflächenbelastung von M = 138 kg/m² ebensoviel Dampf durch Wandheizung erzeugt würde, als durch Selbstverdampfung im Rohr entsteht. Bei niederen Drucken ist die Selbstverdampfung erheblich größer, bei höheren Drucken wird sie kleiner.

Man sieht also, daß diese bisher übersehene Selbstverdampfung von wesentlicher Bedeutung für den Wasserumlauf ist.

Die Selbstverdampfung erklärt auch die sonst unverständliche Umkehr der Strömungsrichtung in den Siederohren. Bekanntlich kommt es bei Dampfkesseln manchmal vor, daß der Umlauf in verkehrter Richtung erfolgt, d. h., daß die Flüssigkeit im beheizten Rohrstrang abwärts strömt und im unbeheizten aufsteigt. Eine ähnliche Strömungsumkehr wurde auch bei Warmwasserheizungen gelegentlich beobachtet.

Die Erklärung der Strömungsumkehr auf Grund der Selbstverdampfung geben die Abbildungen 3 a und b. Sie stellen Ober- und Untertrommel eines Kessels dar, die durch zwei Rohre verbunden sind, von denen jeweils nur das linke beheizt ist.



a) b)

Schematische Darstellung des gewöhnlichen und des verkehrten Wasserumlaufes

Abb. 3

Abbildung 3 a entspricht der üblichen Annahme, daß der Dampf im beheizten Rohr entsteht, aufsteigt und das Wasser in Richtung der Pfeile in Umlauf setzt. Die Dampferzeugung beginnt nicht am unteren Rohrende, da das Wasser in der Untertrommel dieselbe Temperatur wie in der Obertrommel hat. Es muß daher im unteren Teil des beheizten Rohres erst bis auf die dem zusätzlichen Druck der Wassersäule entsprechende Siedetemperatur erwärmt werden. In der Abbildung 3 a sind diese Verhältnisse angedeutet und die Temperaturen an einigen bezeichnenden Punkten eingetragen, wie sie sich etwa bei einem Druck von 760 mm Quecksilbersäule am Wasserspiegel und einer Höhe der Rohre von 4 m einstellen würden. Die Dampfbildung beginnt in der Zeichnung erst etwa in der Mitte des Steigrohres. Die Umlaufsbewegung ist stabil, denn bei einer Verstärkung der Heizung nimmt die Blasenzahl zu und es wächst die Umlaufsgeschwindigkeit, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Bei Verminderung der Heizung nimmt die Umlaufsgeschwindigkeit schließlich bis auf Null ab.

In der Abbildung 3 b ist ein Strömungszustand mit verkehrter Umlaufsrichtung eingezeichnet, den wir uns durch irgendeinen Eingriff hervorgerufen denken. Die Stärke der Beheizung des Steigrohres sei so gewählt, daß bei der gerade vorhandenen Umlaufsgeschwindigkeit keine Dampfbildung eintritt, sondern das Wasser

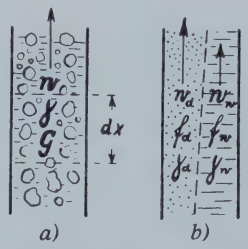
nur soweit erwärmt wird, daß es in die Untertrommel mit einer Temperatur eintritt, die noch etwas unter der seinem Druck entsprechenden Sättigungstemperatur bleibt. Beim Aufstieg des Wassers im unbeheizten Rohr wird dann an einer gewissen Stelle der Sättigungsdruck erreicht und es tritt Selbstverdampfung ein, wobei die gebildeten Dampfblasen aufsteigen und den Umlauf in der durch Pfeile bezeichneten Richtung im Gang halten. Die Temperaturen sind an einigen Stellen des Wasserumlaufes eingezeichnet. Auch diese Bewegung ist, wie man leicht erkennt, stabil. Sobald also durch irgendeinen Umstand ein Umlauf in verkehrter Richtung entstanden ist, kann er dauernd fortbestehen.

Auf die näheren Bedingungen der Stabilität beider Bewegungen und auf die Möglichkeit des Umschlagens der einen Bewegungsform in die andere soll hier nicht näher eingegangen werden. In praktisch wichtigen Fällen sind beide Umlaufsrichtungen möglich und auch tatsächlich beobachtet.

Die Bewegung des Dampfwassergemisches durch das Steigrohr

In einem Siederohr bildet sich im Betrieb ein Dampfwassergemisch, das in wilder turbulenter Bewegung durch das Rohr strömt, wie es Abbildung 4 a an einem Stück des Rohres andeutet. Die Einzelheiten der Bewegung entziehen sich der Beobachtung. Man weiß nur, daß die Dampfblasen wegen ihres Auftriebes eine größere mittlere Geschwindigkeit als das Wasser haben.

Zur Erleichterung der Vorstellung denken wir uns nach Abbildung 4 b alle Dampfblasen des Gemisches auf den einen Teil des Querschnittes, alles Wasser auf den anderen Teil zusammengedrängt, ohne daß an den Geschwindigkeiten etwas geändert wird.



Erklärung der Bezeichnungen

Abb. 4

Wir führen nun folgende Bezeichnungen (vgl. Abbildungen 4 a und b) ein: es sei

G	die durch das Rohr strömende gesamte Gemischmenge in kg/sec,
γ	das mittlere spezifische Gewicht des Gemisches in kg/m³,
w	die mittlere Geschwindigkeit des Gemisches in m/sec,
f	der Rohrquerschnitt in m²,
$L = L_a + L_i$	die an der Stelle x durch den Rohrquerschnitt strömende Dampfmenge in kg/sec,

γ_d	das spezifische Gewicht des Dampfes in kg/m³,
w_d	die mittlere Geschwindigkeit des Dampfes in m/sec,
f_d	der vom Dampf eingenommene Teil des Rohrquerschnittes in m²,
γ_w	das spezifische Gewicht des Wassers in kg/m³,
w_w	die mittlere Geschwindigkeit des Wassers,
$f_w = f - f_d$	der vom Wasser eingenommene Teil des Rohrquerschnittes in m².

Dann können wir an Hand der Abbildung 4b ohne weiteres die folgenden Gleichungen hinschreiben:

(4) $$G = \gamma\, w\, f = \gamma_d\, w_d\, f_d + \gamma_w\, w_w\, f_w$$

(5) $$\gamma = \frac{f_d}{f}\gamma_d + \frac{f - f_d}{f}\gamma_w \quad \text{oder differenziert}$$

(5a) $$d\gamma = (\gamma_d - \gamma_w)\frac{df_d}{f}$$

(6) $$L = \gamma_d\, w_d\, f_d \quad \text{oder differenziert}$$

(6a) $$dL = d(\gamma_d\, w_d\, f_d) = \gamma_d\, w_d\, df_d + \gamma_d\, f_d\, dw_d + w_d\, f_d\, d\gamma_d$$

Die durch Selbstverdampfung gebildete Dampfmenge dL_i erhält man aus der durch das Rohr strömenden Wassermenge $\gamma_w\, w_w\, f_w$ nach der Formel

$$dL_i = c\,(-dP)\,\gamma_w\, w_w\, f_w$$

wenn man abnehmenden Druck als negative Größe einführt. Mit Hilfe von Gl. 4 wird daraus

(7) $$dL_i = c\,(-dP)\;(G - \gamma_d\, w_d\, f_d)$$

Die gesamte Dampfbildung in einem Rohrstück von der Länge dx durch äußere Wärmezufuhr und durch Selbstverdampfung beträgt dann unter Zuhilfenahme von Gl. 1

(8) $$dL = D\, f\, dx - c\, dP\;(G - \gamma_d\, w_d\, f_d)$$

Setzt man die beiden Ausdrücke für dL nach Gl. 6a und 8 einander gleich, so ergibt sich

(9) $$\frac{d(\gamma_d\, w_d\, f_d)}{dx} = D\, f - c\,\frac{dP}{dx}\,(G - \gamma_d\, w_d\, f_d)$$

Für die weitere Rechnung machen wir die folgenden beiden Vereinfachungen:

1. Es soll das spezifische Gewicht des Dampfes γ_d über die ganze Höhe des Steigrohres konstant, also $d\gamma_d = 0$, sein. Das ist der Fall, wenn der Unterschied des hydrostatischen Druckes in Ober- und Untertrommel klein gegen den absoluten Druck des Kessels ist. Setzt man für γ_d einen mittleren Wert ein, so ist bei einem absoluten Kesseldruck von 10 at und einer senkrechten Höhe des Steigrohres von 5 m die Abweichung vom mittleren Druck etwa ± 2,5 %, was auch einer Schwankung des γ_d von ungefähr 2,5 % entspricht, die wir vernachlässigen können.

2. Es soll das durch den Rohrquerschnitt hindurchtretende Dampfgewicht gegen das gesamte Gemischgewicht, also $\gamma_d w_d f_d$ gegen $G = \gamma w f$ vernachlässigt werden. Diese Vernachlässigung ist zulässig bei nicht zu kleinen Gemischgewichten γ und nicht zu hohen Drucken, sie bedeutet, daß die Selbstverdampfung nicht, wie es richtig wäre, aus dem Wassergewicht, sondern aus dem gesamten Gemischgewicht berechnet wird. Bei einem Druck von 40 at ist das spezifische Gewicht des Dampfes $^1/_{50}$ von dem des Wassers. Nehmen wir an, daß im Mittel über die ganze Rohrlänge die Hälfte des Inhaltes vom Dampf erfüllt ist und lassen wir den Dampf mit der doppelten Geschwindigkeit des Wassers strömen, so würden auf 100 Gewichtsteile Wasser 4 Gewichtsteile Dampf kommen. Wir erhalten also bei der Berechnung der Selbstverdampfung aus der gesamten Gemischmenge 4 % zuviel; das ist ein Fehler, der mit Rücksicht auf die übrigen Ungenauigkeiten zugelassen werden kann.

Beide Vereinfachungen sind demnach bei Dampfkesseln üblicher Abmessungen im Druckbereich von 10 bis 40 at zulässig.

Die Gl. 9 vereinfacht sich dann zu

$$\gamma_d \frac{d(w_d f_d)}{dx} = D f - c G \frac{dP}{dx} \tag{10}$$

In dieser Gleichung kommt auf der rechten Seite in dem Ausdruck für die Selbstverdampfung noch der Druckabfall $\frac{dP}{dx}$ im Steigrohr vor, den wir jetzt berechnen wollen.

Vernachlässigen wir für diese Berechnung die Reibung der Gemischsäule an der Wand des Steigrohres, so nimmt der Druck nach oben ab um das Gewicht der Gemischsäule vom spezifischen Gewicht γ und um den Druck, der bei Dampfbildung zur Beschleunigung des Gemisches aufgewandt wird. Es ist demnach

$$-dP = \gamma\, dx + \frac{\gamma}{g} w\, dw,$$

wobei $g = 9{,}81$ m/sec² die Erdbeschleunigung ist, oder wegen

$$\frac{G}{f} = w\gamma = \text{konst und } \frac{dw}{w} + \frac{d\gamma}{\gamma} = 0$$

auch

$$-\frac{dP}{dx} = \gamma - \frac{1}{g}\left(\frac{G}{f}\right)^2 \frac{1}{\gamma^2}\frac{d\gamma}{dx} \tag{11}$$

Die Dampfgeschwindigkeit w_d zerlegen wir nun in die Gemischgeschwindigkeit $w = \frac{G}{f\gamma}$ und die Relativgeschwindigkeit w_{dr} des Dampfes gegen das Gemisch nach der Gleichung

$$w_d = \frac{G}{f\gamma} + w_{dr} \tag{12}$$

Die Relativgeschwindigkeit w_{dr} des Dampfes gegen das Gemisch oder, anders ausgedrückt, die Steiggeschwindigkeit der Blasen ist von der absoluten Bewegung des Gemisches unabhängig, sie kann also auch an einer ruhenden Gemischsäule ermittelt werden.

Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuche zeigten, daß diese Relativgeschwindigkeit außer vom Rohrdurchmesser vom spezifischen Gewicht des Gemisches abhängt und daß sie für einen gegebenen Rohrdurchmesser mit guter Annäherung durch die Gleichung

$$w_{dr} = \frac{C}{\gamma} \tag{13}$$

dargestellt werden kann, wobei C eine für jeden Rohrdurchmesser charakteristische Konstante bedeutet, die wir als Konstante der Relativgeschwindigkeit bezeichnen wollen.

Diese Form der Gleichung 13 ist, wie wir sehen werden, für die mathematische Behandlung besonders glücklich.

Setzen wir die Ausdrücke für f_d, $\frac{dP}{dx}$ und w_d nach den Gleichungen 5, 11, 12 und 13 in Gleichung 10 ein und berücksichtigen die Beziehung $\frac{d\gamma}{\gamma^2} = -d\left(\frac{1}{\gamma}\right)$ so ergibt sich nach einigen Umformungen

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_w - \gamma_d}\ (G + Cf)\ \frac{d\frac{\gamma_w}{\gamma}}{dx} = Df + cG\left[\gamma + \frac{1}{g\gamma_w}\left(\frac{G}{f}\right)^2 \frac{d\frac{\gamma_w}{\gamma}}{dx}\right] \tag{14}$$

Führt man

$$y = \frac{\gamma_w}{\gamma} \tag{15}$$

also das Verhältnis der spezifischen Gewichte von Wasser und Gemisch als neue Unbekannte ein, so erhält man

$$\frac{y}{y + \frac{c\,G\,\gamma_w}{D\,f}}\ dy = \frac{D}{\left(\frac{G}{f} + C\right)\frac{\gamma_d}{\gamma_w - \gamma_d} - \frac{c}{g\,\gamma_w}\left(\frac{G}{f}\right)^3}\ dx \tag{16}$$

das ist eine Gleichung von der Form

$$\frac{y}{y + B}\ dy = A\ dx \tag{16a}$$

wobei

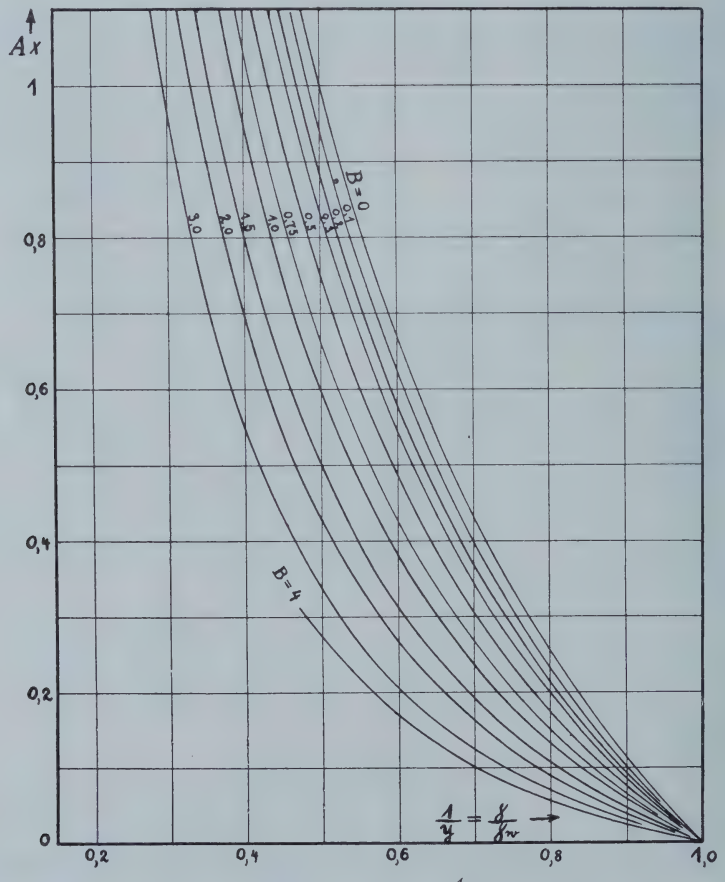
$$A = \frac{D}{\left(\frac{G}{f} + C\right)\frac{\gamma_d}{\gamma_w - \gamma_d} - \frac{c}{g\,\gamma_w}\left(\frac{G}{f}\right)^3}$$

$$B = \frac{c\frac{G}{f}\gamma_w}{D} \tag{17}$$

Die Gleichung 16 bestimmt y und damit die Gemischdichte γ in Abhängigkeit von der Höhe x des Steigrohres, wenn die umlaufende Gemischmenge G bekannt ist. Alle anderen in der Gleichung vorkommenden Größen sind gegebene Werte. Die Gleichung läßt sich leicht integrieren, ihre Lösung lautet:

$$A\,x = y - B \ln (y + B) + \text{konst} \tag{18}$$

Tritt das Wasser gerade mit Sättigungstemperatur in das untere Ende des Steigrohres ein, so ist $y = \frac{\gamma_w}{\gamma} = 1$, bei $x = 0$, daraus ergibt sich die Integrations-



Darstellung des relativen spezifischen Gewichtes $\frac{1}{y} = \frac{\gamma}{\gamma w}$ *des Dampfwassergemisches in Abhängigkeit von der Höhe des Siederohres nach der Funktion*

$$A\,x = y - 1 - B \ln \frac{y + B}{1 + B}$$

Abb. 5

konstante und man erhält als Lösung, die der Grenzbedingung genügt:

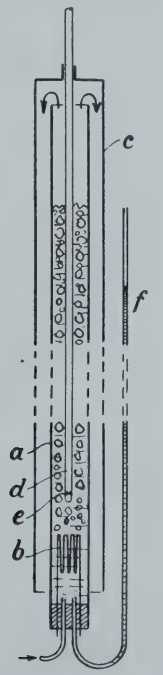
$$A\,x = y - 1 - B \ln \frac{y + B}{1 + B} \tag{18a}$$

Die Größe $B = \dfrac{c \frac{G}{f} \gamma_w}{D}$ hat eine einfache Bedeutung, denn sie ist das Verhältnis der Selbstverdampfung zur Wandverdampfung.

Die Gleichung 18a gibt den Verlauf des Gemischgewichtes längs des Steigrohres. In Abbildung 5 ist das Gemischgewicht $\frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{1}{y}$ in Abhängigkeit von $A \cdot x$ für verschiedene Werte von B dargestellt. Die Kurven lassen unmittelbar erkennen, wie die Dichte des Gemisches vom Werte 1 bei $x = 0$ mit wachsenden $A \cdot x$ abnimmt.

Die Messung der Relativgeschwindigkeit der Dampfblasen

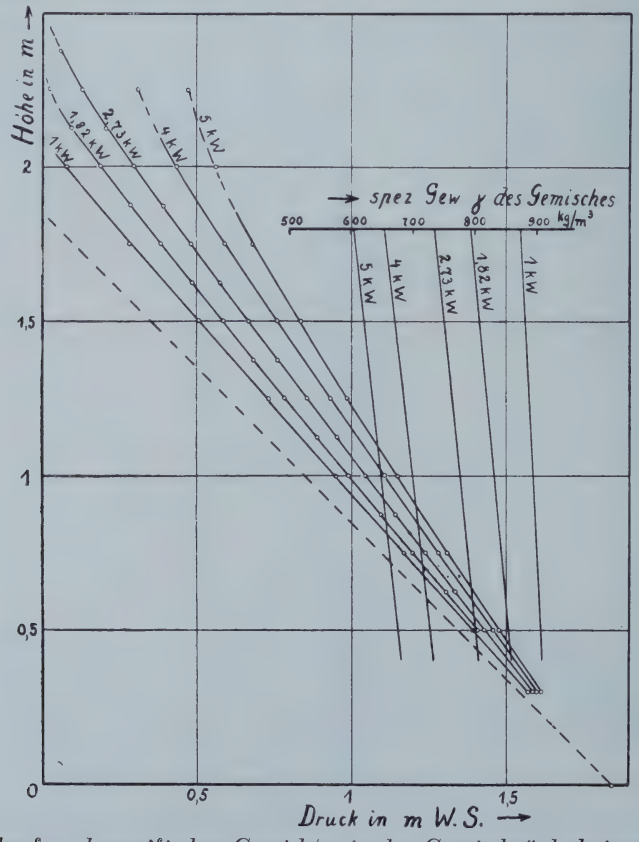
Zur Ermittlung der Relativgeschwindigkeit w_{dr} der Dampfblasen gegen das Dampfwassergemisch diente die in Abbildung 6 skizzierte Versuchseinrichtung [3]). In das mit Wasser gefüllte Rohr a ist unten ein elektrischer Heizkörper b ein-



Versuchseinrichtung zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Dampfwassergemischen

Abb. 6

gebaut, der mit Wechselstrom beheizt wird, um Wasserzersetzung zu verhindern. Die am Heizkörper b entwickelten Dampfblasen steigen durch das Wasser auf und erzeugen ein Dampfwassergemisch, dessen Zusammensetzung über die ganze Höhe des Rohres nahezu konstant ist. Der entwickelte Dampf wird dann zwischen a und einem Mantelrohr c wieder nach unten geführt und verhindert so die Wärmeabgabe des Rohres a. In das Gemisch taucht von oben eine verschiebbare Sonde d mit seitlichen Bohrungen e ein zur Messung des statischen Druckes längs der Schaumsäule. In die Sonde wird unter geringem Überdruck etwas Luft gedrückt, die in einzelnen Bläschen durch die Bohrungen austritt und mit dem Dampf entweicht. Die Messung des Überdruckes der Luft in der Sonde ergibt den hydrostatischen Druck in der Gemischsäule. Die verdampfte Wassermenge wird durch eine Speisevorrichtung von unten ersetzt, so daß das Gemischgewicht im Rohr während eines Versuches genau konstant bleibt, was durch das Wassersäulenmanometer f festgestellt werden kann.

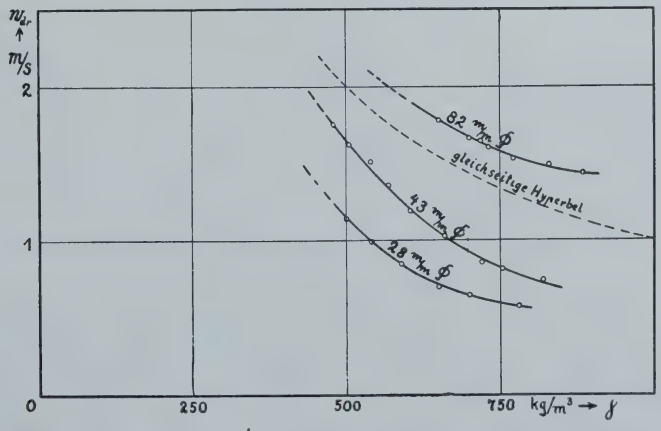


Druckverlauf und spezifisches Gewicht γ in der Gemischsäule bei verschiedenen Heizleistungen in einem Rohr von 82 mm Durchmesser

Abb. 7

Mit dieser Versuchseinrichtung wurden von meinem Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Heinrich Ufer Messungen an 3 Rohren von 28, 43 und 82 mm Durchmesser zunächst bei atmosphärischem Druck ausgeführt. Den mit der Sonde gemessenen Verlauf des Druckes am Rohr von 82 mm Durchmesser bei verschiedenen elektrischen Heizleistungen zeigt die Abb. 7. Die Ordinaten der Abbildung sind die Höhen der Meßstelle über dem elektrischen Heizkörper in m, die Abszissen stellen die gemessenen Drucke der eingeblasenen Luft in m Wassersäule dar. Die Meßpunkte lassen sich überraschend gut aufnehmen, trotzdem das Gemisch sich in stark wallender Bewegung befindet. Nur in der Nähe des oberen Endes der Gemischsäule wird die Messung unsicher, da der Flüssigkeitsspiegel stark auf und nieder schwankt. Aus der Neigung der Kurven erhält man unmittelbar die spezifischen Gewichte γ des Gemisches, die in der Abbildung 7 ebenfalls als Abszissen eingetragen sind. Die Kurven des Druckverlaufes sind bei genauer Betrachtung nicht gradlinig, sondern ein wenig nach unten gekrümmt. Die spezifischen Gewichte des Schaumes sind daher auch längs der Höhe der Schaumsäule nicht konstant, sondern nehmen nach oben etwas ab, was wenigstens zum größten Teil auf die nicht ganz zu vernachlässigende Expansion des Dampfes während des Aufsteigens zurückzuführen ist.

Aus dem spezifischen Gewicht des Gemisches und den bekannten spezifischen Gewichten von Dampf und Wasser erhält man den Querschnittsanteil $\frac{f_d}{f}$ des Dampfes im Rohr. Hieraus und aus der mit Hilfe der elektrischen Heizleistung bestimmten Dampfmenge ergibt sich dann die absolute Geschwindigkeit des Dampfes oder, anders ausgedrückt, die mittlere Steiggeschwindigkeit der Dampfblasen. Die Gemischgeschwindigkeit ist dabei am unteren Rohrende gleich der Geschwindigkeit des zuströmenden Wassers, sie beträgt weniger als 1 mm/sec und kann daher gegen die absolute Dampfgeschwindigkeit vernachlässigt werden.



Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit w_{dr} der Dampfblasen von der Dichte γ des Dampfwassergemisches in Rohren verschiedenen Durchmessers

Abb. 8

Die gemessene absolute Geschwindigkeit des Dampfes ist daher genau genug gleich der gesuchten Relativgeschwindigkeit w_{dr} des Dampfes gegen das Gemisch.

In Abbildung 8 ist für die drei untersuchten Rohre die Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit des Dampfes vom spezifischen Gewicht γ des Gemisches dargestellt. Das Rohr von 82 mm Durchmesser war ein Eisenrohr, die beiden anderen Rohre bestanden aus Glas. Es überrascht, daß die Kurve des engsten Rohres von 28 mm Durchmesser anders liegt, als man nach dem Verlauf der Kurven der weiteren Rohre erwarten sollte. Die Erklärung hierfür ist der durchaus verschiedene Charakter der Bewegung in engen und weiten Rohren. Bei Rohren über 40 mm Durchmesser steigt der Dampf in zahlreichen größeren und kleineren Blasen bei wilder, turbulenter Bewegung des Gemisches auf, während bei Rohren von geringerem Durchmesser sich in regelmäßigen Abständen wenige große Dampfblasen von geschoßähnlicher Form bilden, die den Querschnitt fast ganz ausfüllen und das Wasser an der Wand in geordneter Parallelströmung heruntersinken lassen. Abbildung 9 gibt eine Skizze dieses eigenartigen Vorganges.

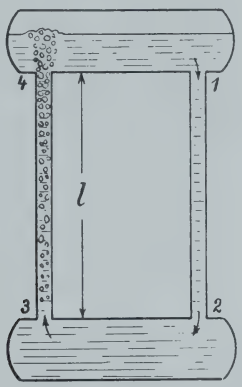
Im engen Rohr aufsteigende Dampfblasen

Abb. 9

Die Bewegungsgleichungen des Wasserumlaufes unter Berücksichtigung der Strömungswiderstände

Die Gleichungen 16 und 18 erlauben die Berechnung der Gemischdichte, wenn die umlaufende Menge G bekannt ist, sie geben also die Lösung für den Fall, daß das Wasser zwangsläufig mit bestimmter Geschwindigkeit in das Steigrohr eintritt. In Wirklichkeit wird aber die Umlaufsbewegung durch den Auftrieb des leichten Gemisches hervorgerufen, und die erreichte Geschwindigkeit hängt wesentlich von den Bewegungswiderständen des Rohrsystems ab, die wir nun betrachten wollen.

Zur Vereinfachung denken wir uns Steigrohre und Fallrohre von gleicher Länge l und von gleichem Durchmesser und setzen für die Verbindung von Fallrohr und Steigrohr durch die beiden Obertrommeln bzw. durch die Untertrommel so große Querschnitte voraus, daß Strömungswiderstände nur im Steig- und Fallrohr und beim Ein- und Austritt aus diesen beiden Rohren in die Trommeln auftreten. Wir ersetzen also den Kessel durch das vereinfachte Schema der Abbildung 10.



Kesselschema für die Berechnung des Wasserumlaufes

Abb. 10

Beim Einlauf aus einem Behälter großen Durchmessers in ein Rohr tritt ein Druckabfall

$$\triangle P_e = (1 + \zeta) \frac{w_o^2}{2g} \gamma_w \tag{19}$$

auf, wobei

w_o = die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das Rohr in m/sec,

γ_w = das spezifische Gewicht das Wassers,

g = 9,81 m/sec² die Erdbeschleunigung,

ζ = eine Verlustziffer

ist.

Bei scharfkantigen Mündungen, wie sie an den Einwalzstellen der Rohre in die Kesseltrommeln anzunehmen sind, hat, nach „Hütte“ 25. Aufl. Bd. I Seite 350, die Verlustziffer den Wert $\zeta = 0{,}5$. Der Druckverlust $\triangle P_e$ tritt beim Einlauf in das Fallrohr und ebenso beim Einlauf in das Steigrohr an den Stellen 1 und 3 der Abbildung 10 auf.

Beim Austritt der Flüssigkeit aus dem Fallrohr bei 2 und beim Austritt des Gemisches aus dem Steigrohr bei 4 soll die Geschwindigkeitshöhe vollständig ohne Druckrückgewinn verloren gehen.

Der Druckverlust durch Reibung im Rohr ist, nach „Hütte“ 25. Aufl. Bd. I Seite 349,

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\lambda}{d}\frac{w^2}{2g}\gamma \tag{20}$$

wobei λ die Widerstandsziffer der Leitung ist, die sich nach der Formel

$$\lambda = 0{,}01\left(\frac{k}{d}\right)^{0{,}314} \tag{20a}$$

aus der Rauhigkeitszahl k und dem Rohrdurchmesser d ergibt. Als Rauhigkeitszahl kann für Siederohre $k = 1{,}5\ m^{-1}$ angenommen werden.

Im Fallrohr, wo das Wasser ohne Dampfentwicklung mit gleichbleibender Geschwindigkeit w_o und konstantem spezifischem Gewicht strömt, ist demnach der Druckabfall durch Reibung

$$\triangle P_f = \lambda\frac{l}{d}\frac{w_o^2}{2g}\gamma_w \tag{21}$$

Im Steigrohr ändern sich γ und w längs des Rohres, wobei an jeder Stelle $w = w_o\frac{\gamma_w}{\gamma}$ ist. Setzt man dies in Gleichung 20 ein, so ergibt sich

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\lambda}{d}\frac{w_o^2}{2g}\gamma_w\frac{\gamma_w}{\gamma}$$

Durch Integration über die ganze Länge l des Steigrohres erhält man den Druckverlust im Steigrohr

$$\triangle P_s = \frac{\lambda}{d}\frac{w_o^2}{2g}\gamma_w\int_0^l\frac{\gamma_w}{\gamma}\,dx \tag{22}$$

Die Größe $\frac{\gamma_w}{\gamma}$, die wir früher mit y bezeichnet hatten, wächst, wie die nähere Untersuchung der Gleichung 18a ergibt, annähernd gradlinig von ihrem Anfangswert l am Rohreintritt bis auf den Wert $\frac{\gamma_w}{\gamma_d} = y_a$ am oberen Rohrende. Man kann daher genau genug

$$\int_0^l\frac{\gamma_w}{\gamma}\,dx = \frac{1+y_a}{2}\,l \tag{23}$$

setzen, wenn man annimmt, daß das Wasser in der Untertrommel gerade Sättigungstemperatur hat.

Außer dem Reibungswiderstand muß aber im Steigrohr noch der Beschleunigungswiderstand $\triangle P_b$ überwunden werden. Nach dem Impulssatz ist

$$\triangle P_b = \frac{G}{g\,f}\left(w_a - w_o\right) \tag{24}$$

wenn

$$w_a = \frac{G}{f\gamma_a} = \frac{G}{f\gamma_w} y_a$$

die Austrittsgeschwindigkeit des Gemisches aus dem Steigrohr an der Stelle $x = l$ bedeutet. Setzt man $w_o = \frac{G}{f\gamma_w}$, so wird

$$\triangle P_b = \frac{1}{g\gamma_w}\left(\frac{G}{f}\right)^2 \left[y_a - 1\right] = \frac{w_o^2}{2g}\gamma_w \left[2y_a - 2\right]$$

Beim Austritt aus dem Steigrohr geht die ganze Geschwindigkeitsenergie des Gemisches wieder verloren. Der gesamte Druckverlust des Umlaufes ist daher

$$\triangle P = \frac{w_o^2}{2g}\gamma_w \left[1 + \zeta + \lambda\frac{l}{d} + 1 + \zeta + \lambda\frac{l}{d}\left(\frac{1+y_a}{2}\right) + 2y_a - 2\right]$$

(25)

$$= \frac{w_o^2}{2g}\gamma_w \left[m + n\,y_a\right]$$

wobei

(25a) $$m = 2\zeta + \frac{3}{2}\lambda\frac{l}{d} \quad \text{und} \quad n = 2 + \frac{1}{2}\lambda\frac{l}{d}$$

zwei Größen sind, die die Strömungswiderstände bestimmen.

Nach diesen Vorbereitungen können wir die Bewegungsgleichung für den Umlauf hinschreiben. Es muß nämlich bei der gesuchten Umlaufsgeschwindigkeit der Auftrieb der Gemischsäule gerade die Widerstände des Umlaufes decken, also

(26) $$\int_0^l \left(\gamma_w - \gamma\right) dx = \frac{w_o^2}{2g}\gamma_w \left[m + n\,y_a\right]$$

Führt man in diese Gleichung $\frac{\gamma_w}{\gamma} = y$ und $dx = \frac{1}{A}\frac{y}{y+B}\,dy$ aus Gleichung 16a ein, so erhält man

$$\frac{1}{A}\int_1^{y_a} \frac{y-1}{y+B}\,dy = \frac{w_o^2}{2g}\left[m + n\,y_a\right]$$

Die Integration läßt sich leicht durchführen und ergibt

(27) $$y_a - 1 + (1+B)\ln\frac{y_a + B}{1+B} = A\frac{w_o^2}{2g}\left[m + n\,y_a\right]$$

dabei ist die Grenzbedingung $y = 1$ für $x = 0$ schon berücksicht. Diese Grenzbedingung bedeutet, daß das Wasser in das Steigrohr mit Sättigungstemperatur eintritt. Es muß das Fallrohr also gerade so stark beheizt sein, daß das Wasser in die Untertrommel mit Sättigungstemperatur eintritt, aber es darf noch kein Dampf im Fallrohr gebildet werden.

Aus der Gleichung 27 ergibt sich

$$\frac{w_o^2}{2g} = \frac{y_a - 1 - (1 + B) \ln \frac{y_a + B}{1 + B}}{A\ (m + n\ y_a)} \tag{28}$$

wobei für A und B nach Gleichung 17 unter Berücksichtigung der Beziehung $\frac{G}{f} = w_o\ \gamma_w$ geschrieben werden kann

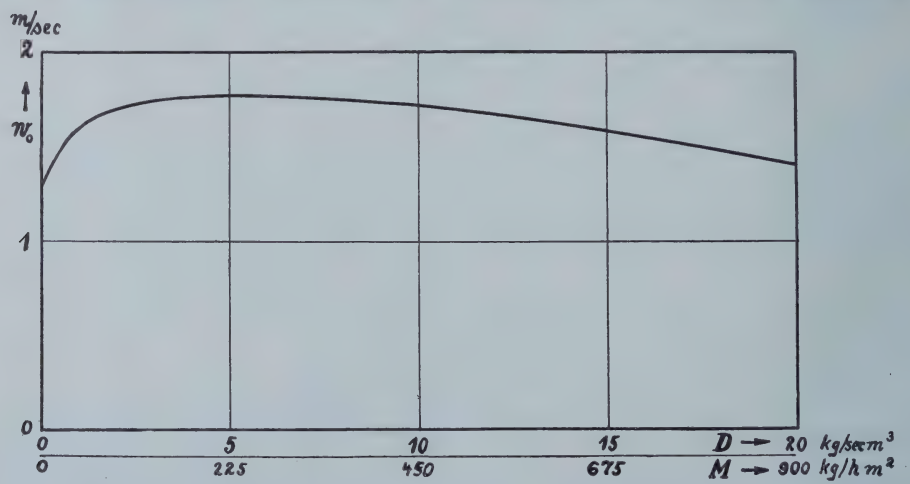
$$A = \frac{D}{(\gamma_w\ w_o + C)\ \frac{\gamma_d}{\gamma_w - \gamma_d} - \frac{c\ \gamma_w^2}{g}\ w_o^3}, \qquad B = \frac{c\ \gamma_w^2}{D}\ w_o$$

und y_a am oberen Rohrende also für $x = 1$ aus der Gleichung

$$y_a - 1 - B \ln \frac{y_a + B}{1 + B} = A\ l$$

zu bestimmen ist.

Die Gleichung 28 enthält nach Einsetzen der Größen B, A und y_a als einzige Unbekannte die gesuchte Geschwindigkeit w und ergibt daher die vollständige Lösung unseres Problems. Die Auflösung nach w_o macht keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, sondern ist nur etwas umständlich, da die Unbekannte auch in den Größen A und B vorkommt. Man muß daher probeweise einen Wert von w_o annehmen, damit A, b und y berechnen und versuchen, ob diese Werte der Gleichung 28



Abhängigkeit der Wassereintrittsgeschwindigkeit von der Heizflächenbelastung bei dem senkrechten Heizrohr eines Steilrohrkessels für 10 atü bei 6 m Länge und 50 mm Innendurchmesser des Rohres

Abb. 11

genügen. Ist das nicht der Fall, so muß man so lange probieren, bis der richtige Wert von w_0 gefunden ist.

Die Rechnung wurde beispielsweise durchgeführt für ein System nach Abb. 10 mit einem Steigrohr und einem Fallrohr von je 50 mm Innendurchmesser und 6 m Höhe bei einem Kesseldruck von 10 atü am Wasserspiegel. Die Beheizung des Fallrohres ist dabei so gewählt, daß in ihm keine Dampfbildung stattfindet, aber das Wasser gerade so weit vorgewärmt wird, daß es mit Sättigungstemperatur in die Untertrommel eintritt. Die Beheizung des Steigrohres wird in weiten Grenzen verändert.

In Abb. 11 ist als Ergebnis dieser Rechnungen die Eintrittsgeschwindigkeit w_0 des Wassers in das Steigrohr in Abhängigkeit von der äußeren Verdampfungsdichte D und damit auch von der Heizflächenbelastung M dargestellt.

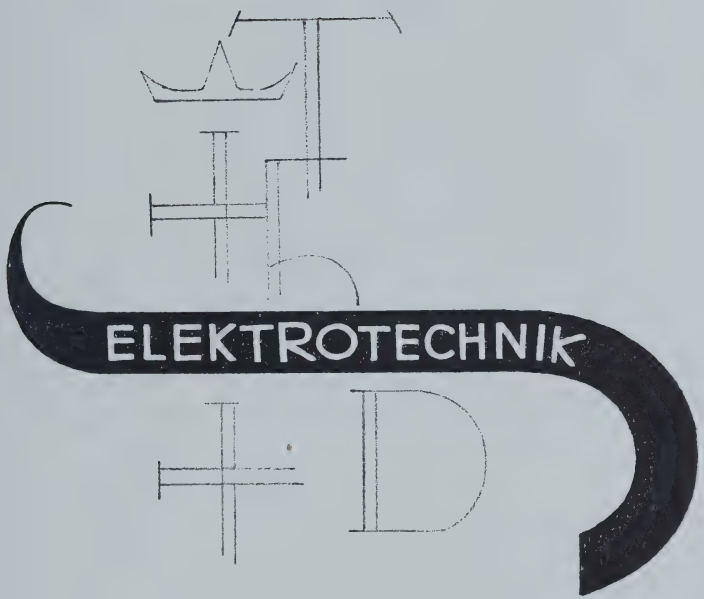
Man sieht, daß die Geschwindigkeit bis zu einer bestimmten Heizflächenbelastung des Steigrohres ansteigt und dann langsam wieder abnimmt. Bei der Heizflächenbelastung $M = 0$, also bei beheiztem Fallrohr und unbeheiztem Steigrohr, beträgt die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in das untere Ende des Steigrohres noch etwa 1,3 m/sec. Wir haben es dann also mit einem Fall verkehrten Umlaufs zu tun.

Anmerkungen

1) Der wesentliche Inhalt der Arbeit wurde auf der Tagung des Ausschusses für Wärmeforschung des V.D.I. am 1. Dezember 1928 in Dresden vorgetragen.

2) F. Münzinger, „Die „Leistungssteigerung von Großdampfkesseln", Berlin, Springer 1922.

3) Die Mittel zur Durchführung der Versuche wurden von der Helmholtz-Gesellschaft zur Verfügung gestellt, wofür ihr auch an dieser Stelle gedankt sei.


ELEKTROTECHNIK

Die Grundlagen der elektrischen Sprachübertragung

Von Prof. Karl Küpfmüller

Der rasche Aufschwung, den die Fernsprechtechnik in den letzten Jahrzehnten, besonders seit der Erfindung der Elektronenröhre, erfahren hat und ihre damit zunehmende wirtschaftliche Bedeutung waren die Ursachen dafür, daß eine grundsätzliche Frage mehr und mehr in den Vordergrund trat, nämlich die Frage: „Wie muß eine Fernsprechverbindung beschaffen sein, damit sie ihren Zweck möglichst vollkommen erfüllt?" Oder mit anderen Worten: „Welches sind die notwendigen physikalischen Eigenschaften einer Fernsprechverbindung?" Erst die Beantwortung dieser Frage kann die Technik in die Lage setzen, die Fernsprechverbindungen mit dem geringsten wirtschaftlichen Aufwand herzustellen.

Mit der Untersuchung dieser Grundfrage der elektrischen Sprachübertragung haben sich etwa während der letzten zehn Jahre die großen Fernmeldelaboratorien eingehend beschäftigt, in Deutschland besonders das Telegraphentechnische Reichsamt und das Zentral-Laboratorium von Siemens & Halske. Hervorragende Beiträge zu diesem Problem haben ferner die Bell-Laboratorien in den Vereinigten Staaten und die Laboratorien der englischen Postverwaltung geliefert. Im folgenden sollen die Vorstellungen kurz zusammengefaßt werden, die man sich auf Grund dieser Untersuchungen heute von dem Wesen der elektrischen Sprachübertragung macht.

Die Beantwortung der oben aufgestellten Frage erfordert zunächst die Einführung eines Maßes für die Güte oder die Brauchbarkeit einer Fernsprechverbindung. Hier begegnet man aber einer eigentümlichen Schwierigkeit. Man kann zunächst sagen, daß der gewöhnliche Zweck einer Fernsprechverbindung darin besteht, zwei räumlich weit voneinander entfernten Personen die Abwicklung eines Gespräches zu ermöglichen. Der Idealfall ist dann der, daß dieses Gespräch genau so vor sich geht, wie wenn die beiden Gesprächspartner den Weg der unmittelbaren Verständigung von Mund zu Ohr wählen könnten. Als Maß für die Annäherung an diesen Idealfall könnte man etwa die Zeitdauer des Ferngespräches betrachten im Vergleich zu der Zeitdauer, die das gleiche Gespräch bei unmittelbarer Verständigung erfordert hätte. Je geringer die Übertragungsgüte einer Fernsprechverbindung ist, um so häufiger werden Mißverständnisse vorkommen und Rückfragen nötig sein, um so mehr Zeit wird zur Vollendung des Gespräches erforderlich werden. Diese Formulierung schließt aber die Unmöglichkeit der praktischen Anwendung in sich, denn ein Gespräch ist eine einmalige Begebenheit, die sich nicht wiederholen läßt.

Man hat daher versucht, angenäherte Maße für die Brauchbarkeit einer Fernsprechverbindung aufzustellen. Diese Maße sind die sogenannten Verständlichkeitsmaße; sie beruhen auf dem Gesetz der großen Zahlen. Würde man die Zeitdauer t_1 feststellen, die für eine sehr große Zahl von verschiedenen Ferngesprächen benötigt wird, und diese Zeit vergleichen mit der Zeit t_0, die eine gleich große Anzahl ähn-

licher Gespräche bei unmittelbarer Verständigung in Anspruch nimmt, so könnte man bei einer hinreichend großen Anzahl von derartigen Gesprächen theoretisch eine beliebige Annäherung an das Idealmaß der Übertragungsgüte der Fernsprechverbindung erhalten, etwa in dem Quotienten

$$\eta = \frac{t_0}{t_1}$$

der beiden Zeitspannen; diesen Quotienten könnte man als den Wirkungsgrad der Übertragung bezeichnen. Aber auch ein derartiges Verfahren würde praktisch noch auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoßen. Man beschränkt sich daher auf die Übertragung von Gesprächselementen, nämlich von Sätzen, Worten und Silben. Es wird dann einfach festgestellt, welcher Prozentsatz des Gesprochenen verstanden wurde. So erhält man die „Satzverständlichkeit", die „Wortverständlichkeit" und die „Silbenverständlichkeit". Zählt man schließlich bei der Übertragung von Silben noch ab, welcher Prozentsatz der einzelnen Sprachlaute verstanden wurde, so ergibt sich die „Lautverständlichkeit".

Von diesen Verständlichkeitsmaßen dient heute besonders die Silbenverständlichkeit zur Beurteilung der Übertragungsgüte. Die Silbenverständlichkeitsmessung läßt sich verhältnismäßig leicht ausführen, sie liefert ein brauchbares Bild von der Eignung eines Fernsprechsystems. Es sind sogar erfolgreiche Versuche unternommen worden, aus den Silbenverständlichkeitswerten die anderen Verständlichkeitsmaße rechnerisch zu ermitteln.

Da die Verständlichkeitsmaße naturgemäß einen stark subjektiven Charakter haben müssen, so erfordert ihre Feststellung eine ganz bestimmte Technik. Es soll daher zunächst kurz die Ausführung der Silbenverständlichkeitsmessungen beschrieben werden. Von besonderer Wichtigkeit ist die Auswahl der Silben. Es hat sich als zweckmäßig herausgestellt, möglichst nur Silben zu verwenden, die für sich allein keinen Sinn ergeben, da sonst die Streuung der Meßergebnisse durch die intellektuelle Streuung der Beobachter stark vergrößert wird. Es werden daher künstliche Silben verwendet. Die einzelnen Sprachlaute sollen dabei die gleiche Häufigkeit haben, wie sie beim Sprechen längerer zusammenhängender Texte vorliegt. Um aussprechbare Silben dieser Art zu bekommen, stellt man die Silben auf folgende Weise her: Man zerlegt mehrere Texte verschiedenen Inhalts in die einzelnen Silben. Jede Silbe läßt sich allgemein in eine Anfangskonsonantengruppe, eine Vokalgruppe und eine Endkonsonantengruppe unterteilen, wobei eine der Konsonantengruppe auch fehlen kann. Die Anfangs-, Mittel- und Endgruppen werden zu drei entsprechenden Mengen gemischt und aus diesen Mengen wieder ausgelost. Man erhält so Silben, unter denen sich nur wenige finden, die für sich einen Sinn ergeben; sie werden beseitigt. Das Bild 1 zeigt ein auf diese Weise hergestelltes Textblatt mit 100 Silben, die Aussprache deckt sich im allgemeinen mit der des Alphabets.

Die Silbenverständlichkeitsmessung besteht nun darin, daß diese Silben vorgelesen und von einer größeren Anzahl von Beobachtern aufgenommen werden. Die Beobachter notieren alles, was sie zu verstehen glauben. Durch Vergleich mit dem Textblatt wird dann der Prozentsatz der richtig verstandenen Silben für jeden Beobachter ermittelt, und es werden Mittelwert und Streuung berechnet. Es zeigt

sich nun, daß dieser Mittelwert mit wachsender Zahl der übertragenen Silben immer enger um einen bestimmten Grenzwert schwankt, und daß die Abweichung von diesem Grenzwert schon bei 400 bis 500 Silben und 5 Beobachtern nur noch 1 bis 2 % beträgt. Es werden daher für jede Messung 500 Silben verwendet, die

Text Nr.79

fraf	niend	zeur	jan	set
nucht	gul	jern	nen	bron
he	ron	ren	dai	ses
tön	me	is	dü	ne
diel	dul	spren	tangs	kommt
ziech	schli	bit	din	ucht
nei	frielit	gech	zer	nirn
sche	le	gun	krerd	hend
nek	on	sier	ba	schas
wit	techt	li	gein	le
lei	lers	to	cher	ner
ten	kaht	wend	won	dor
dern	iel	dost	do	gengs
naur	vond	ges	bum	zwen
dagt	ger	trub	lu	ri
beng	pre	wa	dün	un
ron	ke	ind	graur	chin
rehr	deil	wech	un	le
zi	lif	sag	sian	gies
speir	heind	gär	ren	hes

Textblatt für Verständlichkeitsmessungen

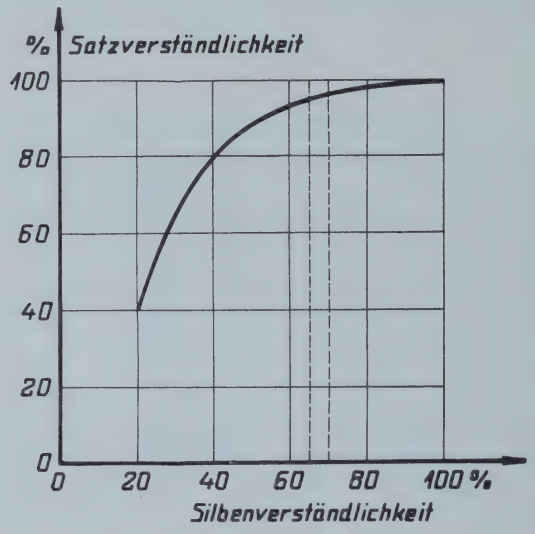
Bild 1

Meßwerte sind dann mit einer Genauigkeit von etwa 2 % reproduzierbar. Um Gedächtniseinflüsse auszuschließen, muß im ganzen eine sehr große Anzahl von Silben, etwa 5000 bis 10 000, zur Verfügung stehen. Wichtig ist es noch, daß die Schnelligkeit des Vorlesens der Silben geregelt wird. Hierzu verwendet man ein optisches Metronom, das für jede zu lesende Silbe ein Zeichen gibt. Als günstigster Abstand für die Silben gilt 2 bis 3 Sekunden.

Es ist bemerkenswert, daß eine Silbenverständlichkeit von 100 % beim direkten Sprechen nur unter ganz besonderen Umständen erreicht werden kann, nämlich nur in schalldicht abgeschlossenen Räumen mit möglichst reflexionsfreier Wandbekleidung und bei sorgfältigem Ausschluß aller Nebengeräusche. Natürlich gehört dazu auch, daß die Silben richtig ausgesprochen werden und daß die Beobachter ein normales Gehör haben. Man benutzt diese Tatsache zur Eignungsprüfung der Sprecher und Beobachter für die Verständlichkeitsmessungen. Interessant ist, daß das Hören mit beiden Ohren nicht wesentlich zur Erzielung der vollen Verständlichkeit ist; auch bei einohrigem Hören erreicht man Werte von 98 bis 100 %.

Beim gewöhnlichen Sprechverkehr begnügt man sich im allgemeinen mit wesentlich niedrigeren Verständlichkeitswerten. In einem Zimmer mittlerer Größe findet man eine Silbenverständlichkeit von etwa 80 bis 85 %, ohne daß dies als störend empfunden wird. Man fügt die fehlenden Silben oder Laute durch Erraten unwillkürlich hinzu. Die Verminderung der Silbenverständlichkeit hat ihre Ursache einmal in Reflexionserscheinungen infolge der Zimmerwände und Gegenstände, ferner im Vorhandensein irgendwelcher störenden Geräusche und schließlich in der Abnahme der Lautstärke mit dem Abstand vom Sprecher. Es ist interessant, daß das

Auftreten von Geräuschen, deren Intensität nur das 10^{-5}fache der mittleren Intensität der Sprachlaute beträgt, die Silbenverständlichkeit bereits um 5 bis 10 % herabsetzen kann.



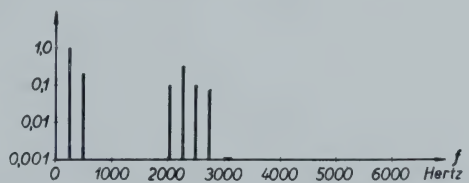
Satzverständlichkeit und Silbenverständlichkeit

Bild 2

Über den Einfluß des Erratens der fehlenden Silben gibt das Bild 2 Aufschluß. Es ist hier gezeigt, wie groß die Satzverständlichkeit bei verschiedenen Werten der Silbenverständlichkeit ist. Die Messung der Satzverständlichkeit wird so ausgeführt, daß man kurze, nicht zusammenhängende Sätze überträgt und feststellt, wieviel Sätze richtig verstanden wurden. Bei 80 % Silbenverständlichkeit, also 20 % fehlenden oder falsch verstandenen Silben, beträgt die Satzverständlichkeit noch etwa 98 %, bei 60 % Silbenverständlichkeit noch etwa 93 %. Noch höher würde die Prozentzahl sein bei der Übertragung der zusammenhängenden Sätze eines Gespräches. Man nimmt daher an, daß bis herab zu einer Silbenverständlichkeit von etwa 60 % noch keine nennenswerte Behinderung in der Abwicklung des Gespräches eintritt. Bei der drahtlosen Telephonie über große Entfernungen kommen Zeiten vor, in denen die Silbenverständlichkeit infolge von atmosphärischen Störungserscheinungen bis auf 30 % und noch weniger herabsinkt. Dabei hat sich gezeigt, daß selbst bei derartig geringen Verständlichkeitswerten eine Verständigung noch möglich ist; besonders Zahlen werden auch bei niedriger Silbenverständlichkeit noch gut verstanden. Allerdings sind dann bereits häufig Rückfragen nötig, und es ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mißverständnissen groß. Man betrachtet daher heute eine Silbenverständlichkeit von 65 bis 70 % als wünschenswert und ausreichend für die glatte Abwicklung eines Gespräches beliebiger Art. Dieser Wert der Silbenverständlichkeit wird in der Technik angestrebt.

Höhere Anforderungen liegen natürlich vor, wenn es sich um künstlerische Übertragungen handelt, also z. B. um Rundfunk- oder Lautsprecherübertragungen. Hier will man nicht allein das gesprochene Wort verstehen können, sondern man fordert auch eine möglichst weitgehende Natürlichkeit der Übertragung. Für derartige Zwecke hat man bereits elektrische Sprachübertragungssysteme mit einer Silbenverständlichkeit von 97 % hergestellt.

Mit Hilfe der Verständlichkeitsmessungen kann man die elektrischen Sprachübertragungseinrichtungen auf ihre Brauchbarkeit hin untersuchen und die Wirkung von irgendwelchen Verbesserungsmaßnahmen quantitativ beobachten. Um nun einen Zusammenhang zwischen diesen mehr subjektiven Beobachtungen und den physikalischen Eigenschaften der Fernsprechverbindung herzustellen, hat man einen Weg weiter verfolgt, den F. Breisig und A. Franke bereits um etwa 1890 eingeschlagen haben. Man ersetzt die komplizierten Schallschwingungen der Sprachlaute durch einfache sinusförmige Schwingungen und untersucht das Verhalten der Fernsprechverbindung bei der Übertragung solcher Sinusschwingungen. Dabei geht man davon aus, daß die Schallschwingungen der Sprachlaute nach Fourier in sinusförmige Komponenten zerlegt werden können. Die Frequenzen dieser Teilschwingungen füllen dann zwar genau genommen den ganzen Bereich zwischen Null und Unendlich aus. Es ergibt sich aber eine wesentliche Vereinfachung dieser Betrachtungsweise durch die Erfahrung, daß die wichtigen Teilschwingungen der Sprachlaute sich auf einen verhältnismäßig kleinen Frequenzbereich beschränken, nämlich auf den Bereich von etwa 100 Hz bis 10 000 Hz. Man kann sogar die meisten Sprachlaute durch einige wenige sinusförmige Teilschwingungen darstellen, nämlich durch eine Grundschwingung, die für die Klanghöhe des Lautes maßgebend ist, und einige Oberschwingungen, die Formanten, die für sich die Flüstersprache bilden und die charakteristischen Eigenschaften des Lautes ergeben, also für die Verständlichkeit bestimmend sind. Als Beispiel zeigt Bild 3 die wichtigsten Teilschwingungen, die im Vokal „i" enthalten sind. Als Ordinaten sind die Amplituden der Teilschwingungen aufgetragen, als Abszissen ihre Frequenz. Die Grundschwingung liegt bei etwa 300 Hz. Die wichtigen Formanten reichen bis etwa 2800 Hz.

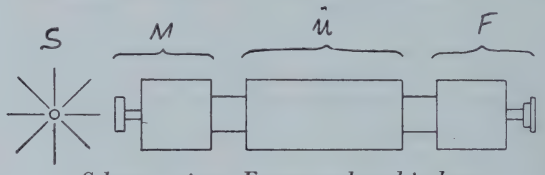


Teilschwingungen des Vokals „i"

Bild 3

Eine Fernsprechverbindung besteht nun in physikalischer Hinsicht grundsätzlich aus einem Mikrophonsystem M, einem Telephon- oder Fernhörersystem F und einem Übertragungssystem Ü, Bild 4. Das Mikrophonsystem verwandelt die von der Schallquelle S ausgehende akustische Energie in elektrische Energie; es wird bei

einem gewöhnlichen Fernsprechapparat durch das eigentliche Kohlemikrophon mit den zugehörigen Stromversorgungseinrichtungen gebildet. Das Fernhörersystem stellt aus den elektrischen Schwingungen wieder die Schallschwingungen her; bei einem Fernsprechapparat besteht das Fernhörersystem im wesentlichen aus dem eigentlichen Fernhörer und einem Transformator. Das Übertragungssystem bildet im allgemeinen den kompliziertesten Teil der Fernsprechverbindung. Bei einer



Schema einer Fernsprechverbindung

Bild 4

Drahtverbindung besteht es aus den Leitungen mit ihrem Zubehör, den Amtseinrichtungen und den Verstärkern. Bei einer drahtlosen Fernsprechverbindung enthält das Übertragungssystem grundsätzlich einen Modulator, der die niederfrequenten Schwingungen in hochfrequente Schwingungen verwandelt, ferner den Sender, den Übertragungsweg im freien Raum und schließlich die Empfangseinrichtung mit dem Demodulator, der die hochfrequenten Schwingungen wieder in niederfrequente Schwingungen umsetzt.

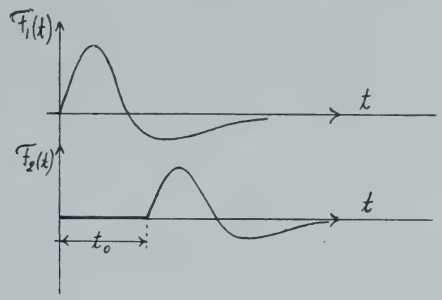
Die Modulation beruht in dieser Vorstellungsweise darauf, daß man auf Einrichtungen mit nichtlinearen Eigenschaften gleichzeitig die zu übertragende niederfrequente Schwingung mit der Frequenz f_1 und eine hochfrequente Schwingung mit der Frequenz f_0 wirken läßt. Es entstehen dann alle Kombinationsschwingungen mit den Frequenzen $m f_0 \pm n f_1$. Von diesen wählt man die aus mit den Frequenzen $f_0 + f_1$, $f_0 - f_1$ und f_0. Diese drei Hochfrequenzschwingungen werden vom Sender ausgestrahlt. Am Empfangsort kann man aus diesen drei Hochfrequenzschwingungen wieder die Schwingungen mit der Frequenz f_1 herstellen, wenn man sie wiederum auf ein nichtlineares System, den Demodulator, der im einfachsten Falle aus einem Gleichrichter besteht, einwirken läßt. Auch hier entstehen wieder alle Kombinationsschwingungen, und man kann die mit der Frequenz f_1 von diesen auswählen. Die Auswahl der gewünschten Schwingungen geschieht sowohl im Sender wie auch im Empfänger mit Hilfe von Resonanzkreisen oder Kombinationen von Resonanzkreisen, den sogenannten Kettenleitern oder Wellenfiltern.

Die Übertragung über eine Fernsprechverbindung könnte man in physikalischer Hinsicht als vollkommen ansehen, wenn irgendein von der Schallquelle S ausgehender Impuls von beliebigem zeitlichen Verlauf $F_1(t)$, Bild 5, vom Fernhörer nach einer bestimmten Zeit getreu wiedergegeben wird, wenn also

$$F_2(t) = c\, F_1(t - t_0) \qquad (1)$$

wobei c eine Konstante bedeutet. t_0 würde man dann als die Laufzeit des Systems bezeichnen können. Die Größe dieser Laufzeit ist für die Abwicklung eines Ge-

spräches bedeutungslos, solange sie unter einer gewissen Grenze bleibt; diese Grenze liegt etwa bei 0,5 bis 1 sec. Denkt man sich nun die beiden Funktionen F_1 und F_2 durch Fouriersche Integrale dargestellt, so kommt man zu folgender



Verzerrungsfreie Übertragung

Bild 5

Formulierung für die bildgetreue Übertragung. Es sei in S eine Schallquelle tätig, die eine sinusförmige Schallschwingung mit der Kreisfrequenz ω liefert. Der Schalldruck am Mikrophon ist daher in der Form

$$p_1 e^{j\omega t}$$

darstellbar, wobei $j = \sqrt{-1}$. Dann wird der Schalldruck im Fernhörer F nach hinreichend langer Zeit ebenfalls eine Schwingung mit der Kreisfrequenz ω enthalten, die sich in der Form

$$p_1 e^{j\omega t - b - ja}$$

darstellen läßt. Die Bedingungen dafür, daß die Übertragung bildgetreu ist, lauten dann

$$\left.\begin{aligned} b &= \text{konst} = \ln \frac{1}{c}, \\ \frac{da}{d\omega} &= \text{konst} = t_0 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots \qquad (2)$$

Die Größe b nennt man die Dämpfung des Systems, die Größe a den Übertragungswinkel. Wenn $b = 0$ ist, wird die Stärke der Schallschwingung am Fernhörer genau so groß sein wie am Mikrophon. Je größer b ist, um so kleiner ist die Lautstärke der Übertragung. Die Gl. (2) formulieren die Bedingungen der bildgetreuen Übertragung der ganzen Fernsprechverbindung. Man kann diese Überlegung sinngemäß auch auf die einzelnen Teile der ganzen Verbindung anwenden. Auf diese Weise werden Dämpfung und Übertragungswinkel der einzelnen Teile definiert. Sind für jeden Teil die Bedingungen (2) erfüllt, dann muß auch die ganze Einrichtung beliebige, von der Schallquelle ausgehende Impulse, also auch Laute

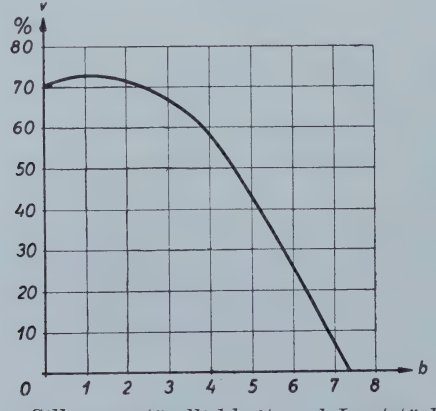
beliebiger Art, getreu übertragen; die Einrichtung ist verzerrungsfrei. Der Vorteil dieser Darstellungsweise liegt darin, daß man die Größen a und b für jede Frequenz und jeden Abschnitt der Verbindung leicht messen kann. Man erhält auf diese Weise die sogenannten Frequenzcharakteristiken; sie zeigen, wie weit die Bedingungen der verzerrungsfreien Übertragung für jeden Teil erfüllt sind.

Die Abweichungen von den Bedingungen (2) bezeichnet man als die Verzerrungen der Fernsprechübertragung. Diese Verzerrungen können dreierlei Art sein. Ist die erste Bedingung nicht erfüllt, ändert sich also b mit der Frequenz ω, so spricht man von Dämpfungsverzerrung. Ist $\frac{da}{d\omega}$ von der Frequenz abhängig, so spricht man von Phasenverzerrung. Schließlich gibt es noch eine dritte Möglichkeit der Abweichung von den Bedingungen der verzerrungsfreien Übertragung, wenn nämlich die Größen b und a von der Amplitude der Schwingung, also von p_1 abhängen. Diese Art der Verzerrung nennt man die nichtlineare Verzerrung.

Auf Grund dieser Vorstellungen muß also die Verständlichkeit einer Fernsprechverbindung bestimmt sein:

1. durch die Lautstärke,
2. durch die Verzerrungen, nämlich Dämpfungs-, Phasen- und nichtlineare Verzerrung, und
3. durch die Störgeräusche.

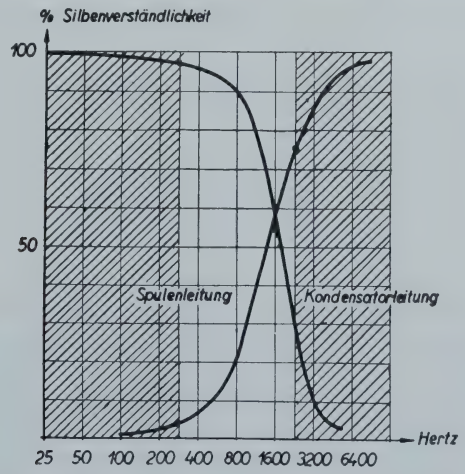
Diese Einteilung hat die Möglichkeit gegeben, jeden einzelnen Einfluß für sich zu untersuchen, so daß man die Anforderungen ziemlich genau ermitteln konnte, die hinsichtlich jeder dieser Übertragungseigenschaften gestellt werden müssen. Nur dadurch ist es möglich geworden, daß man heute mit den modernen Mitteln der Fernsprechtechnik beinahe jede beliebige Entfernung auf der Erde überbrücken kann. Im folgenden wird ein Überblick über das Zustandekommen und die Wirkung jeder der genannten Übertragungseigentümlichkeiten gegeben.



Silbenverständlichkeit und Lautstärke

Bild 6

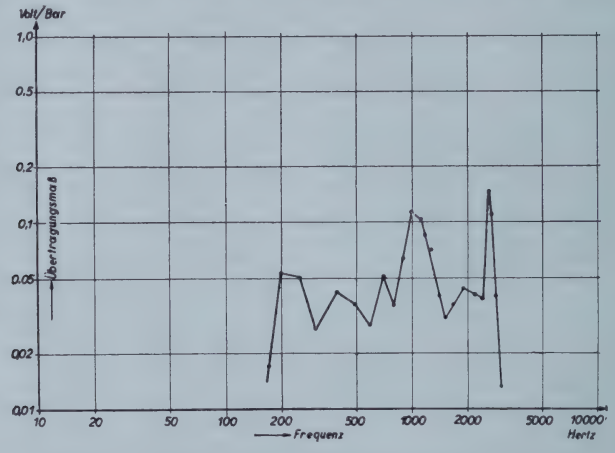
Was zunächst die Lautstärke anbelangt, so muß naturgemäß mit abnehmender Lautstärke die Verständlichkeit schließlich immer geringer werden. Bild 6 zeigt die auf Grund von Messungen gefundene Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit von der Lautstärke. Als Maß der Lautstärke ist die Dämpfung b aufgetragen. Es bedeutet $b = 1$ ein Amplitudenverhältnis von $e = 2{,}718$; diese Dämpfung $b = 1$ bezeichnet man als die Übertragungseinheit mit 1 Neper. Die Verständlichkeit hat bei einer bestimmten Lautstärke entsprechend einer Dämpfung von etwa 1 Neper ein Maximum. Die Dämpfung ist bei den Drahtfernsprechverbindungen im wesentlichen bestimmt durch die Energieverluste auf den Leitungen, bei drahtlosen Übertragungen in der Hauptsache durch die Energiezerstreuung im Raum. Diese Energieverluste kann man durch die Verstärker wieder aufheben, allerdings nur bis auf einen kleinen Rest, der dadurch bedingt ist, daß in allen Fernsprechverbindungen Echowirkungen auftreten. Diese Echowirkungen werden im allgemeinen um so stärker, je kleiner die Gesamtdämpfung der Verbindung ist; man muß daher eine bestimmte Restdämpfung zulassen. Aus diesem Grunde müssen bei Fernsprechverbindungen großer Länge Dämpfungswerte bis etwa 3 Neper in Kauf genommen werden. Das Bild 6 zeigt, daß die Verständlichkeit bei 3 Neper bereits wesentlich niedriger ist als die maximale mit den Fernsprechapparaten erreichbare Verständlichkeit. Hier liegt daher ein Problem der Fernsprechtechnik vor, das noch nicht vollständig gelöst ist. Bemerkenswert ist noch, daß die Verständlichkeit bei etwa 7,5 Neper praktisch auf Null herabsinkt. Dies ist wichtig wegen des sogenannten Nebensprechens. In den Fernsprechkabeln ist eine große Anzahl von Sprechkreisen räumlich eng vereinigt. Das elektromagnetische Feld jedes Sprechkreises durchsetzt auch die anderen. Es entsteht Nebensprechen. Man sieht aus Bild 6, daß die Dämpfung des Nebensprechens größer als 7,5 Neper sein muß, damit auf den Nachbarleitungen nichts mehr verstanden werden kann.



Wirkung der Begrenzung des Frequenzbereiches

Bild 7

Die wichtigste Form der Dämpfungsverzerrung bildet die Einschränkung des Frequenzbereiches, der von der Fernsprechverbindung übertragen wird. Bild 7 zeigt, in welcher Weise die Silbenverständlichkeit von der oberen und unteren Begrenzung des Frequenzbereiches abhängt. Zur Begrenzung des Frequenzbereiches verwendet man bei den Untersuchungen Wellenfilter, also Anordnungen aus Drosselspulen und Kondensatoren, die bei geeigneter Bemessung beliebig einstellbare Frequenzbereiche hindurchlassen. Nach Bild 7 tragen die Frequenzen unter 300 Hz nur wenig zur Verständlichkeit bei; sie bestimmen hauptsächlich die Klangfarbe. Dagegen sind die hohen Frequenzen sehr wichtig. Will man eine Ver-

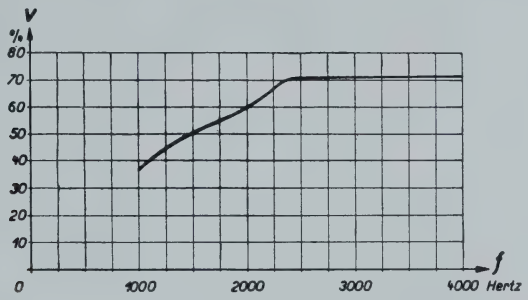


Frequenzcharakteristik eines Fernsprechmikrophons

Bild 8

ständlichkeit von 75 %, so muß man alle Frequenzen bis etwa 2400 Hz übertragen. Der Bereich zwischen 300 und 2400 Hz wird heute als der notwendige Übertragungsfrequenzbereich der Telephonie angesehen. Es ist interessant, auf Grund dieser Feststellung die Frequenzcharakteristik eines normalen Fernsprechmikrophons zu betrachten. In Bild 8 ist das Verhältnis der Spannung am Ausgang eines solchen Mikrophons zum Schalldruck vor dem Mikrophon in Abhängigkeit von der Frequenz aufgetragen. Es bedeutet 1 Bar = 1 dyn/cm². Derartige Messungen werden erst seit verhältnismäßig wenigen Jahren ausgeführt; die Schwierigkeiten liegen darin, daß es sich um verhältnismäßig kleine Drucke und hohe Frequenzen handelt, und daß die Messungen auch in akustischer Hinsicht der betriebsmäßigen Verwendung des Fernsprechapparates entsprechen müssen. Es ist bemerkenswert, wie die empirische Entwicklung der Mikrophone hiernach fast genau zu dem Frequenzbereich gekommen ist, den wir heute als maßgebend ansehen. Das Kohlemikrophon überträgt nach Bild 8 die Frequenzen zwischen etwa 200 und 2500 Hz. Ganz ähnliche Verhältnisse liegen auch beim Fernhörer vor. Die normalen Fernhörer der Fernsprechapparate übertragen die Frequenzen von angenähert dem gleichen Bereich. Stellt man daher mit gewöhnlichen Fernsprechapparaten die Abhängigkeit

der Silbenverständlichkeit von der oberen Frequenzgrenze fest, so wird die Verständlichkeit oberhalb 2500 Hz nur noch unwesentlich wachsen können. Dies bestätigt auch das Bild 9, das für normale Fernsprechapparate der deutschen Reichspost gilt. Bei Verwendung gewöhnlicher Fernsprechapparate hat es daher keinen Nutzen, das Übertragungssystem für ein breiteres Frequenzband als etwa 2500 Hz

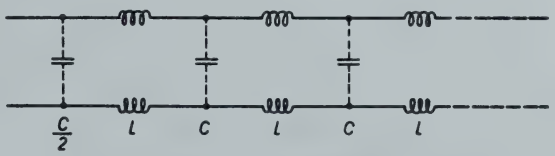


Silbenverständlichkeit bei normalen Fernsprechapparaten

Bild 9

herzustellen. Die Übertragungssysteme werden im allgemeinen um so kostspieliger, je breiter der Frequenzbereich ist, der übertragen werden soll. Die Frequenz 2400 Hz stellt daher zugleich eine wirtschaftliche Grenze dar.

Diese Erkenntnis ist besonders wichtig für die Fernkabelleitungen, mit denen der Hauptteil der Fernsprechverbindungen großer Länge hergestellt wird. Diese Fernkabelleitungen werden heute ausschließlich nach dem Pupinsystem eingerichtet. Die Pupinleitung, Bild 10, entsteht dadurch, daß man in bestimmten regelmäßigen

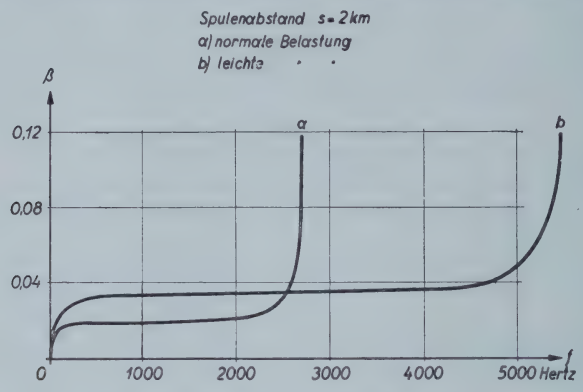


Schema der Pupinleitung

Bild 10

Abständen Drosselspulen in den Leitungszug einbaut. Durch diese Pupinspulen werden die Stromwärmeverluste in den Leitungen verringert, die Leitungen können daher bei gleichem Gesamtverlust billiger hergestellt werden. Die Spulen bilden mit den Leitungsabschnitten infolge deren Kapazität Schwingungskreise mit einer bestimmten Eigenfrequenz. Es ist nun eine Eigentümlichkeit der Pupinleitung, daß sie nur Frequenzen bis zu dieser Eigenfrequenz wirksam überträgt. Als Beispiel zeigt das Bild 11 die Dämpfung von Fernkabelleitungen in ihrer Abhängigkeit von der Frequenz, und zwar für die sogenannte normale Pupinisierung mit Spulen

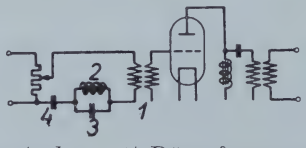
von 0,2 H in 2 km Abständen und für die „leichte“ Pupinisierung, nämlich mit Spulen von 0,05 H in den gleichen Abständen. Die Dämpfung steigt jenseits der Grenzfrequenz stark an. Je schwächer die Pupinisierung, die „Belastung“, ist, um so breiter wird das übertragene Frequenzband, um so teurer sind aber auch die Leitungen, weil die Pupinisierung entsprechend weniger wirksam ist. Man wählt



Dämpfung von Fernkabelleitungen

Bild 11

daher immer die Belastung so stark, wie es der zu übertragende Frequenzbereich zuläßt. Bild 11 zeigt ferner, daß auch unterhalb der Eigenfrequenz die Dämpfung bereits etwas mit der Frequenz ansteigt. Dieser Anstieg erscheint zwar gering, die Differenz wächst jedoch mit der Leitungslänge, so daß ganz beträchtliche Unterschiede vorkommen würden. Bei einer Leitungslänge von 1000 km würde z. B. die Dämpfung für die Frequenz 2000 Hz schon um 4 Neper größer sein als für 800 Hz, d. h. die Amplituden würden etwa im Verhältnis 1 : 50 verschieden geschwächt werden. Um diese unzulässige Dämpfungsverzerrung zu vermeiden, wendet man das

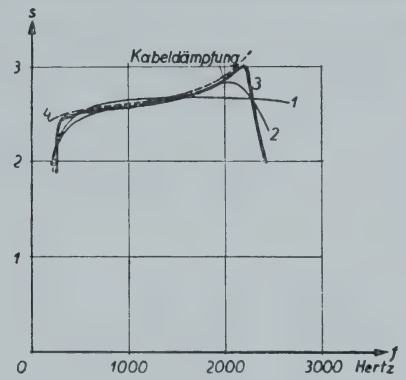


Verstärker mit Dämpfungsausgleich

Bild 12

Mittel des „Dämpfungsausgleichs“ an. Man baut die Verstärker, die in Abständen von 70 km und 140 km angebracht werden, so, daß die Verstärkung genau in gleicher Weise mit der Frequenz wächst wie die Dämpfung. Dies wird durch besondere Schaltmittel, die aus Spulen, Kondensatoren und Widerständen in geeigneter Weise zusammengesetzt werden, erreicht. Bild 12 veranschaulicht die grundsätzliche Schaltung eines solchen Verstärkers. Die Ausgleichselemente sind mit 1, 2, 3 und 4 bezeichnet. Ihre Wirkung auf die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung wird

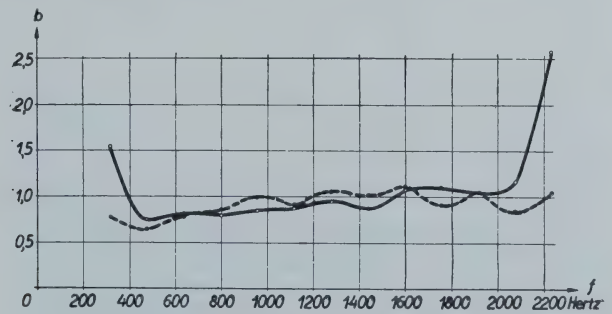
durch Bild 13 dargestellt. Die gestrichelte Kurve gibt die Kabeldämpfung an, die durch die Verstärkungskurve nachgebildet werden soll. Auf diese Weise kann man die Bedingung, daß die Dämpfung b in dem Übertragungsfrequenzbereich konstant sein soll, selbst bei großen Leitungslängen gut erfüllen. Das



Wirkung des Dämpfungsausgleichs

Bild 13

Bild 14 zeigt die Restdämpfung einer Leitung von Berlin nach London. Der Übertragungsfrequenzbereich liegt hier zwischen 300 und 2200 Hz, entsprechend einer Silbenverständlichkeit von etwa 60 %.

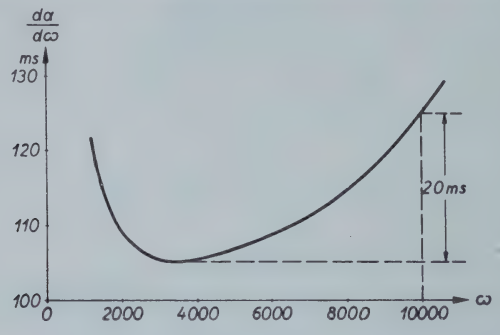


Dämpfung einer Leitung Berlin—London

Bild 14

Eine eigentümliche Art der Verzerrung bildet die Phasenverzerrung. Auf Grund der Resonanztheorie des Hörens hat man bereits früher geschlossen, daß die Phasenunterschiede bei der Wahrnehmung der Sprachlaute keine wesentliche Rolle spielen können. Diese Vermutung hat sich in der Tat weitgehend bestätigt. Bei wachsender Länge der Fernkabelleitungen treten jedoch Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Komponenten der Sprachlaute auf, die

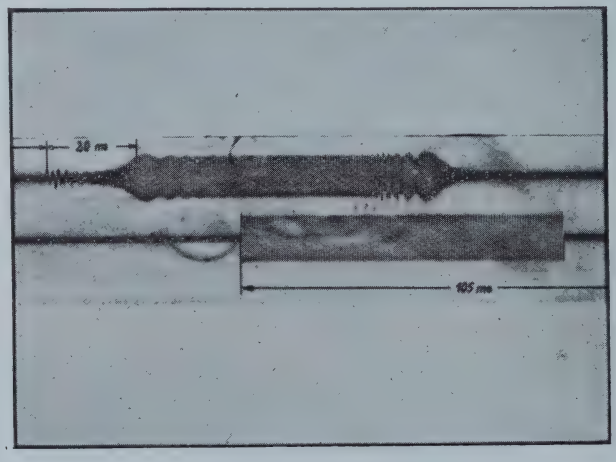
schließlich eine zulässige Grenze überschreiten; die Phasenverzerrung macht sich dann störend bemerkbar. Eine übersichtliche Darstellung der Phasenverzerrung erhält man, wenn man die Größe $\frac{da}{d\omega}$ in Abhängigkeit von der Frequenz aufträgt. In der Physik ist diese Größe als die „Gruppenlaufzeit" bekannt. Die Bedingung



Frequenzabhängigkeit der Laufzeit bei normaler Pupinisierung

Bild 15

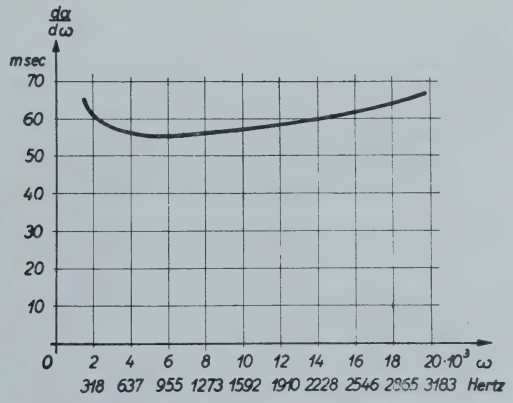
(2) für die verzerrungsfreie Übertragung fordert also, daß die Gruppenlaufzeit unabhängig von der Frequenz sein soll. Abweichungen von dieser Bedingung ergeben ganz ähnliche Erscheinungen wie die der Dispersion in der Optik. Die einzelnen Wellenzüge kommen nach verschiedenen Zeiten zum Leitungsende; die



Einschwingvorgang infolge Phasenverzerrung

Bild 16

Zeitunterschiede werden durch die Differenzen der Gruppenlaufzeiten angezeigt. Bild 15 stellt die Abhängigkeit der Gruppenlaufzeit von der Frequenz für eine normal pupinisierte Fernkabelleitung dar. Eine Schwingung von der Kreisfrequenz $\omega = 10\,000$ kommt danach 20 msec später zum Leitungsende als eine Schwingung von der Kreisfrequenz $\omega = 4000$. Es äußert sich dies auch darin, daß ein plötzlich der Leitung aufgedrückter Wechselstrom am Leitungsende seinen stationären Verlauf nur allmählich erreicht. Bild 16 veranschaulicht diesen „Einschwingvorgang"; die Einschwingzeit beträgt etwa 20 msec entsprechend der aus Bild 15 hervorgehenden Laufzeitdifferenz. Beim Fernsprechen über eine solche Leitung hört man Zwitscherlaute, die von den gegen die Grundschwingung zeitlich verschobenen Oberschwingungen herrühren; ferner klingt die Sprache eigen-



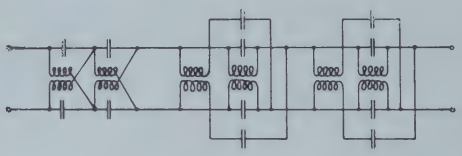
Frequenzabhängigkeit der Laufzeit bei leichter Pupinisierung

Bild 17

tümlich verwaschen, die Verständlichkeit ist herabgesetzt. Als zulässige Grenze für die Phasenverzerrung einer guten Fernsprechverbindung betrachtet man eine Laufzeitdifferenz von 10—15 msec.

Zur Verringerung der Phasenverzerrung in den Pupinleitungen werden zwei Mittel angewendet. Zunächst wird die Phasenverzerrung geringer, wenn man die Leitungen schwächer pupinisiert. Bild 17 zeigt die Laufzeitkurve für eine leicht belastete Fernkabelleitung. Bei gleicher Länge betragen hier die Laufzeitunterschiede nur etwa ¼ von denen der normal belasteten Leitung. Allerdings werden damit auch die Kosten der Fernsprechleitung beträchtlich erhöht. Um diese Verteuerung der Leitungen zu vermeiden, ist von der Firma Siemens & Halske noch ein zweites Mittel entwickelt worden: der „Phasenausgleich". Wie der Dämpfungsausgleich besteht der Phasenausgleich darin, daß man durch besondere Anordnungen aus Spulen und Kondensatoren in den Verstärkern die Verzerrung beseitigt. Die Laufzeitkurve der Phasenausgleichsmittel muß also gerade die entgegengesetzte Frequenzabhängigkeit haben wie die der Leitungen, man ergänzt durch die Phasenausgleichseinrichtungen die Laufzeit auf einen bestimmten,

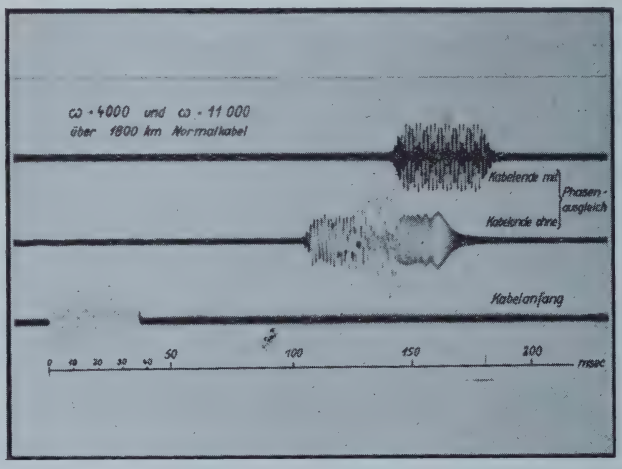
frequenzunabhängigen Wert. Bild 18 zeigt das Schema einer derartigen Phasenausgleichsleitung; sie besteht aus sogenannten Kreuzglieder-Kettenleitern. Die Wirkung der Phasenverzerrung und des Phasenausgleichs wird durch Bild 19 veranschaulicht. Es wurden hier zwei Schwingungen mit den Kreisfrequenzen 4000



Phasenausgleich

Bild 18

und 11000 gleichzeitig auf den Anfang einer Leitung von 1800 km Länge gegeben. Das untere Oszillogramm zeigt den zeitlichen Verlauf dieser Wechselströme. Die beiden Schwingungen laufen mit verschiedener Geschwindigkeit über die Leitung, und zwar trifft die Schwingung mit der niedrigeren Frequenz zuerst am Leitungs-



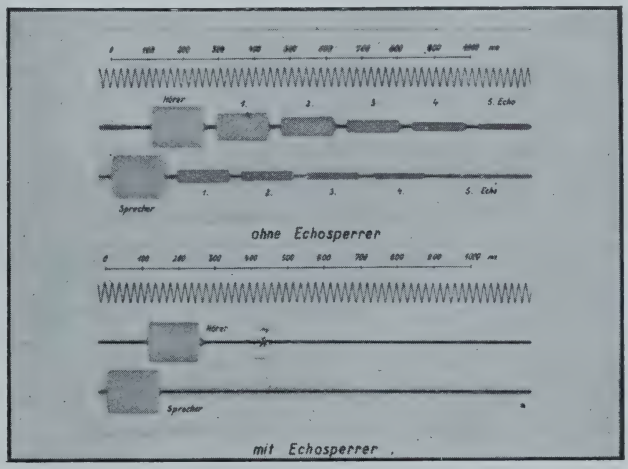
Wirkung des Phasenausgleichs

Bild 19

ende ein, wie es das mittlere Oszillogramm zeigt. Es ergibt sich aus diesem Oszillogramm, daß die Laufzeit für die niedrigere Frequenz etwa 100 msec beträgt, während die Schwingung mit der höheren Frequenz etwa 25 msec später eintrifft, entsprechend der Laufzeitkurve Bild 15. Leitet man nun diese zeitlich gegeneinander verschobenen Ströme noch durch die Phasenausgleichsleitung, so wird die Schwingung mit der niedrigeren Frequenz so lange verzögert, bis sie wieder mit der

anderen Stromkomponente zusammenfällt. Der ursprüngliche zusammengesetzte Stromverlauf ist dann wieder hergestellt, wie es das obere Oszillogramm zeigt.

Eine Übertragungsstörung, die ebenfalls auf Dämpfungs- und Phasenverzerrung beruht, bildet die Echo-Erscheinung. Bei den Drahtübertragungen werden die Echoerscheinungen dadurch hervorgerufen, daß an jeder elektrischen Unregelmäßigkeit der Leitungen Teile der Sprechströme reflektiert werden, die zum Leitungsanfang zurückwandern. Sie werden bei großen Leitungslängen als Echo wahrgenommen und können eine beträchtliche Störung des Sprechverkehrs bewirken. Bei den Fernkabelverbindungen werden daher von etwa 500 km Länge ab die sogenannten Echosperren verwendet, die diese Echoerscheinungen unterdrücken. Diese Echosperren benützen wie die Fernsprechverstärker reine Elektronen-



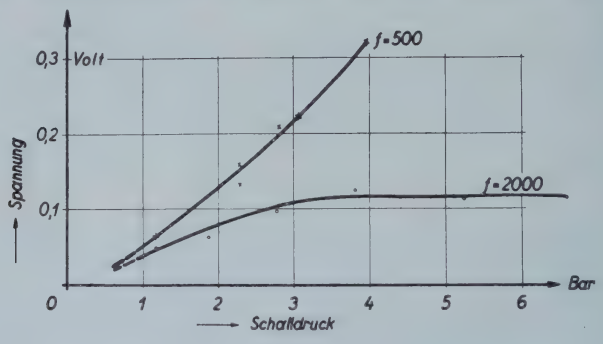
Wirkung der Echosperren

Bild 20

steuerung mit Hilfe von Hochvakuumröhren. Die Wirkung der Echosperren wird durch Bild 20 veranschaulicht. Das obere Bild zeigt eine besonders ausgeprägte Echoerscheinung; es sind sowohl beim Sprecher als auch beim Hörer mehrfache Echos zu beobachten. Das untere Oszillogramm zeigt den gleichen Fall bei Anwendung von Echosperren.

Bei den drahtlosen Fernsprechübertragungen werden echoähnliche Erscheinungen noch durch Reflexion an atmosphärischen Schichten besonderer elektrischer Struktur und an der Erdoberfläche hervorgerufen, ferner durch mehrmaligen Lauf der elektromagnetischen Wellen um die Erde. Als das wirksamste Mittel zur Verminderung dieser bei großen Entfernungen und kurzen Wellen besonders ausgeprägten und häufig vorkommenden Echoerscheinungen hat sich bis jetzt die möglichst enge Bündelung der ausgestrahlten Energie erwiesen, also die Verwendung von sogenannten Strahlwerfern für die Sende- und Empfangsantennen.

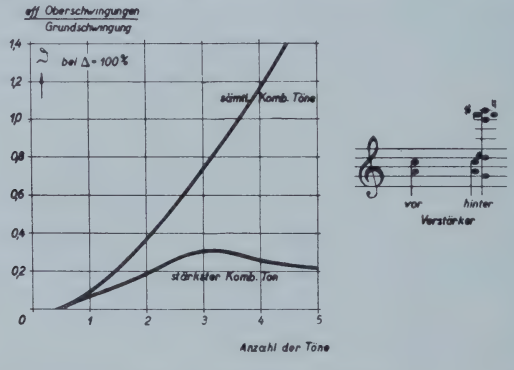
Die nichtlineare Verzerrung entsteht immer, wenn die Ströme, Spannungen oder Schalldrucke an den verschiedenen Stellen der Sprachübertragungseinrichtung nicht einander proportional sind. Solche nichtlinearen Charakteristiken haben zunächst die Kohlemikrophone. Bild 21 zeigt die Abhängigkeit der Spannung



Amplitudenabhängigkeit bei einem Kohlemikrophon

Bild 21

am Ausgang eines Kohlemikrophons vom Schalldruck. Eine besonders starke Abweichung von der Proportionalität liegt bei der Frequenz 2000 Hz vor. Nichtlineare Verzerrungen treten ferner in den Elektronenröhren auf, besonders wenn diese über ein gewisses Maß hinaus belastet werden. Es entstehen dann Kom-

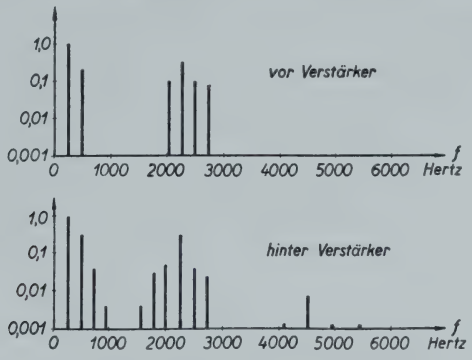


Kombinationsschwingungen bei nichtlinearer Verzerrung

Bild 22

binationstöne mit eigentümlichen Frequenzverhältnissen, die als klirrende Nebengeräusche wahrgenommen werden. Das Bild 22 veranschaulicht diese Wirkung der nichtlinearen Verzerrung einer Elektronenröhre. Die Stärke der entstehenden Nebentöne wächst mit der Anzahl der Teilschwingungen des zu übertragenden Lautes

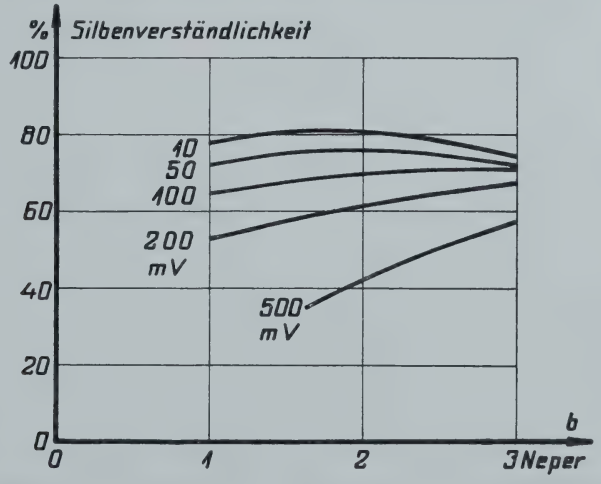
stark an. Als weiteres Beispiel gibt Bild 23 die Teilschwingungen im Vokal i vor und nach dem Durchlaufen eines normalen Verstärkers an. Es treten neue Schwingungen auf, die im ursprünglichen Laut nicht enthalten waren. Ferner sind die Amplituden der Teilschwingungen verändert. Die nichtlineare Verzerrung ist



Teilschwingungen des Vokals „i" vor und hinter einem Verstärker

Bild 23

indessen von verhältnismäßig geringem Einfluß auf die Verständlichkeit. Selbst bei starken Oberschwingungen sinkt die Verständlichkeit nur um wenige Prozent. Bei den Fernkabelleitungen sehr großer Länge hat die nichtlineare Verzerrung ihre

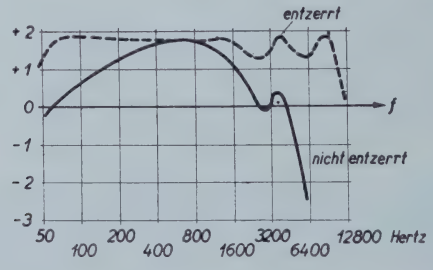


Wirkung von Geräuschen auf die Silbenverständlichkeit

Bild 24

Hauptursache in den Hystereseeigenschaften des in Transformatoren und Pupinspulen verwendeten Eisens.

Schließlich sind noch die Geräuschstörungen zu betrachten. Die Ursachen, die zu Geräuschstörungen bei der elektrischen Sprachübertragung führen können, sind außerordentlich zahlreich. Eine wichtige Rolle spielen die Oberschwingungen der Starkstromanlagen, sei es, daß die Fernsprechleitungen durch parallel laufende Hochspannungsleitungen beeinflußt werden, sei es, daß die Oberschwingungen aus den Stromversorgungsanlagen der Fernsprech- und Verstärkungseinrichtungen herrühren. Besonders gefährdet hinsichtlich des Auftretens von Geräuschstörungen ist die drahtlose Sprachübertragung. Hier kommen zu den anderen Ursachen noch die atmosphärischen Störungen. Als Beispiel für die Wirkung der Geräusche bei der Sprachübertragung zeigt Bild 24 die Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit von der Lautstärke, und zwar bei verschiedenen, aber jeweils gleichbleibenden relativen Geräuschstärken. Die Geräuschstärken sind in mV angegeben; sie sind auf den Leitungsanfang bezogen. Es ergibt sich bei großen



Frequenzcharakteristik eines hochwertigen Sprachübertragungssystems

Bild 25

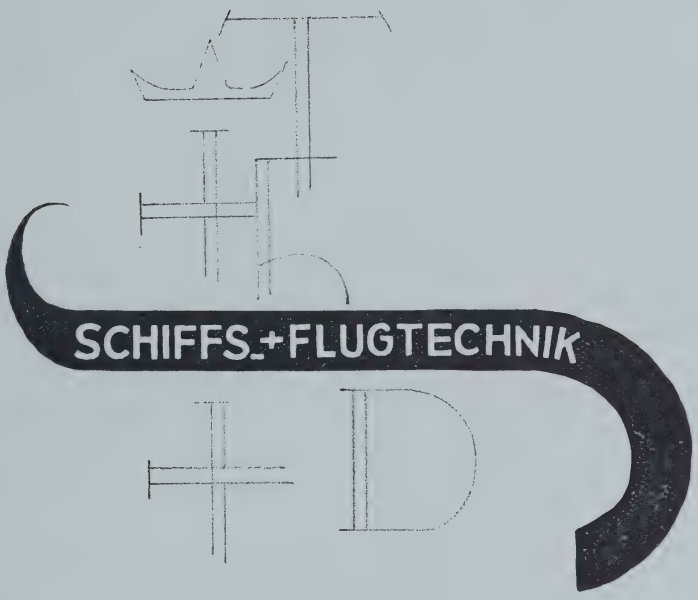
Geräuschlautstärken die merkwürdige Erscheinung, daß die Silbenverständlichkeit zunimmt, wenn die Dämpfung b vergrößert, also die Lautstärke verkleinert wird. Der Grund hierfür liegt in nichtlinearen Eigenschaften des Gehörorgans. Bei Leitungen mit sehr starken Geräuschen kann man daher durch Anwendung von Verstärkern am Leitungsende keine Verbesserung der Verständlichkeit erzielen.

Im Vorstehenden sollte ein Überblick gegeben werden über die Faktoren, die bei der elektrischen Sprachübertragung maßgebend sind und über die eigentümlichen Schwierigkeiten, die die Fernsprechtechnik zu überwinden hat. Bild 25 zeigt schließlich die Frequenzcharakteristik einer hochwertigen Sprachübertragungseinrichtung, die etwa dem besten Stand der heutigen Übertragungstechnik entspricht. Die Kurven stellen die Gesamtverstärkung eines Systems aus Mikrophon, Verstärker und Lautsprecher dar, und zwar wird das Mikrophon durch das elektro-dynamische Bandmikrophon, der Lautsprecher durch den Falt-Lautsprecher von Siemens & Halske gebildet. Die gestrichelt gezeichneten Kurven wurden durch besondere Ausgleichsmittel in den Verstärkern erreicht, so daß hier ein Frequenzbereich von 50 Hz bis etwa 12000 Hz nahezu verzerrungsfrei übertragen wird. Die Silbenverständlichkeit einer solchen Einrichtung beträgt etwa 97—98 %.

Bei derartigen Anlagen für hochwertige Übertragung ist eine verhältnismäßig hohe Leistung der Verstärker erforderlich, da eine natürliche Übertragung nur erreicht werden kann, wenn man die Lautstärke ungefähr gleich der natürlichen Lautstärke macht. Der Übertragungsmechanismus des menschlichen Ohres ist stark nichtlinear; es werden daher auch bei den normalen Lautstärken im Ohr selbst subjektive Kombinationstöne erzeugt, die an der Klangempfindung wesentlichen Anteil haben. Besonders für Musikübertragungen hat man daher bereits Lautsprechereinrichtungen mit Leistungen bis zu 1 kW hergestellt. Eine Schwierigkeit bei hohen Anforderungen an die Natürlichkeit ist noch die, daß bei der Klangwahrnehmung auch die räumliche Ausdehnung der Schallquellen eine wichtige Rolle spielt und besonders deren räumliche Richtwirkung. Hier harrt für die Sprach- und Musikübertragungstechnik noch manches Problem seiner Lösung.

Literatur

F. Breisig, Theoretische Telegraphie, Braunschweig, 1924.
H. Fletcher, Journ. Frankl. Inst., Juni 1922.
L. C. Pocock, Journ. Inst. El. Eng., 1924, **62**, S. 791.
K. Küpfmüller, Elektr. Nachrichtentechnik, 1926, S. 82.
K. Küpfmüller, Europ. Fernsprechdienst, 1927, Nr. 5.
H. F. Mayer, Elektr. Nachrichtentechnik, 1927, **4**, H. 4.
F. Lüschen, Telegr. und Fernsprechtechnik, 1928, H. 5.
B. S. Cohen, Journ. Inst. El. Eng., 1928, **66**, S. 165.
O. Böhm, Elektr. Nachrichtentechnik, 1928, **5**, S. 413.
J. Collard, Electrical Communication, 1929, **7**, S. 175.
L. G. Bostwick, Bell System Techn. Journ., 1929, 8, S. 135.


SCHIFFS- + FLUGTECHNIK

Die Wirtschaftlichkeit von großen Frachtschiffen mit Dampf- oder Dieselmotorantrieb

Von Professor Dr.-Ing. Rudolf Erbach

Einleitung

Nach einer an Mißerfolgen reichen Versuchszeit vor dem Kriege hat sich der Dieselmotor in neuer Zeit schnell in die Großfrachtschiffahrt eingeführt. Nach Lloyds Register 1927/28 beträgt der Prozentsatz der durch Dieselmotoren angetriebenen großen Frachtschiffe über 4000 Br.-R.-T. nach ihrer Tonnage etwa 10 % aller mit Maschinenkraft betriebenen großen Frachtschiffe. Im Bau von Dampfantriebsmaschinen sind in den letzten Jahren große Verbesserungen eingeführt worden und es ist nicht abzusehen, welche weiteren Vervollkommnungen im Öl- und Dampfmaschinenbau uns die nächste Zeit noch bringen wird.

Von den Antriebsarten für große Frachtschiffe sollen hier nur Kolbenmaschinen und Turbinen mit Kohlefeuerung in Betracht gezogen werden, da Dampffrachtschiffe mit Ölfeuerung bei dem Preisverhältnis zwischen Heizöl und Bunkerkohle nur in wenigen Sonderfällen wirtschaftlich sein können und nur noch selten gebaut werden.

Die Tatsache, daß trotz der großen technischen und wirtschaftlichen Erfolge des Dieselmotors rund die Hälfte der Neubauten von großen Frachtschiffen heute doch noch Dampfmaschinen erhält, beweist, daß eine absolute Überlegenheit des einen oder anderen Antriebs zur Zeit nicht besteht, daß also der Vorzug der einen oder anderen Antriebsart bedingt ist durch die besonderen Betriebsverhältnisse des Schiffes.

Ausschlaggebend für die Wahl des Antriebes kann in der Frachtschiffahrt nur die Wirtschaftlichkeit sein, wobei unter Wirtschaftlichkeit im weitesten Umfange alles verstanden werden soll, was das Gesamtergebnis des Reedereibetriebes günstig beeinflußt. Weil eine absolute Überlegenheit eines der beiden Antriebe nicht besteht, ist eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsberechnung zwischen Dampf- und Motorfrachtschiff wichtig und interessant; weil aber in der Schiffahrt die Gesamtwirtschaftlichkeit des Reedereibetriebes von so mannigfachen, stets wechselnden schwer zu erfassenden Einflüssen abhängig ist, ist dieser Vergleich auch so schwer durchzuführen. Es kann daher im Rahmen dieses Aufsatzes keineswegs eine Grenzlinie gezogen werden, die angibt, unter welchen Betriebsverhältnissen der eine oder der andere Antrieb vorteilhafter ist, sondern es ist Zweck dieses Aufsatzes, lediglich den Gang einer solchen vergleichenden Wirtschaftlichkeitsberechnung schematisch zu beschreiben, wobei absolute Zahlenwerte mehr beispielsweise gegeben werden, ohne bei dem steten Wechsel dieser Werte den Anspruch auf unbedingte Richtigkeit

zu erheben. Man könnte daher diesen Aufsatz auch bezeichnen: „Anleitung zu einer vergleichenden Wirtschaftlichkeitsberechnung von großen Dampf- und Motorfrachtschiffen".

Eine grundsätzliche Schwierigkeit für solche Vergleiche besteht darin, daß schiffbautechnische Berechnungen, seemännische und maschinenbetriebstechnische Erfahrungen sowie kaufmännische Überlegungen aus dem Gebiete des gesamten Reedereibetriebes zusammenwirken müssen, um alle Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit restlos zu erfassen. Weder der Techniker noch der Reeder besitzt aber diese umfassende Kenntnis des gesamten Gebietes; dem Techniker fehlen die seemännischen betriebstechnischen Fragen und kaufmännischen Gesichtspunkte, während dem Reeder wiederum die tiefere Erkenntnis der technischen Zusammenhänge mangelt. Nur die intensive und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen den Konstrukteuren der Werft oder Reederei und dem eigentlichen Reedereibetrieb kann zu der Konstruktion eines Schiffes von größter Wirtschaftlichkeit führen.

Wie aus den beigefügten Schaubildern (Fig. 1 u. 2) zu erkennen ist, beginnt die starke Vermehrung der Dieselmotorschiffe etwa mit dem Jahre 1923. Sicher ist der Hauptgrund für die häufigere Anwendung des Dieselmotors seit 1923, daß erst um diese Zeit betriebssichere und nicht mehr zu teure Motoren von einer ganzen Anzahl von Werften und Maschinenfabriken hergestellt wurden. Aber die Einführung des

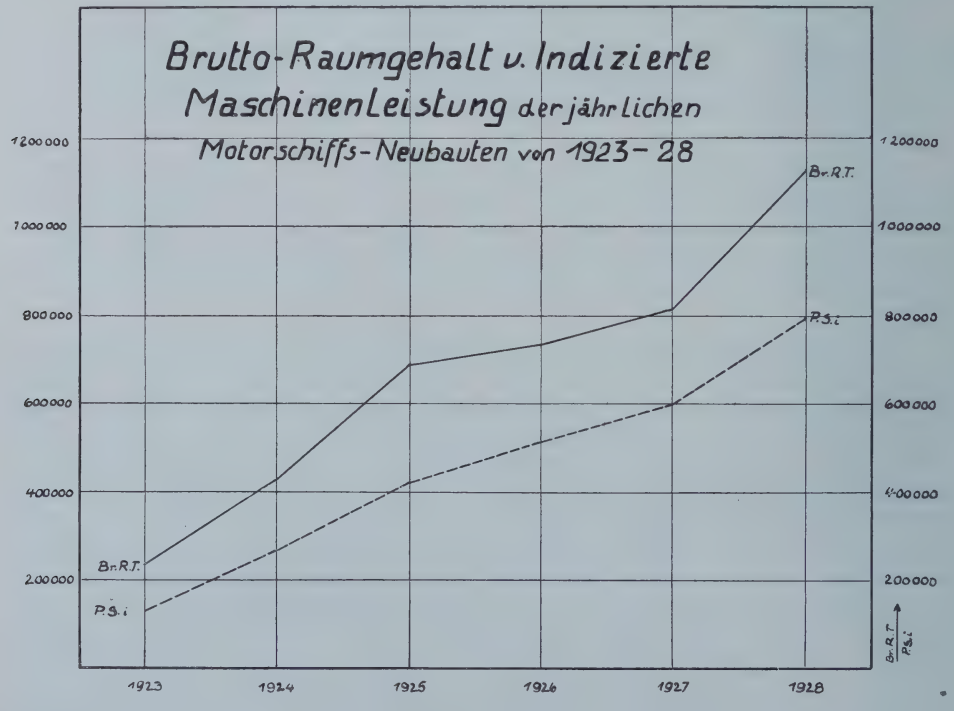


Fig. 1

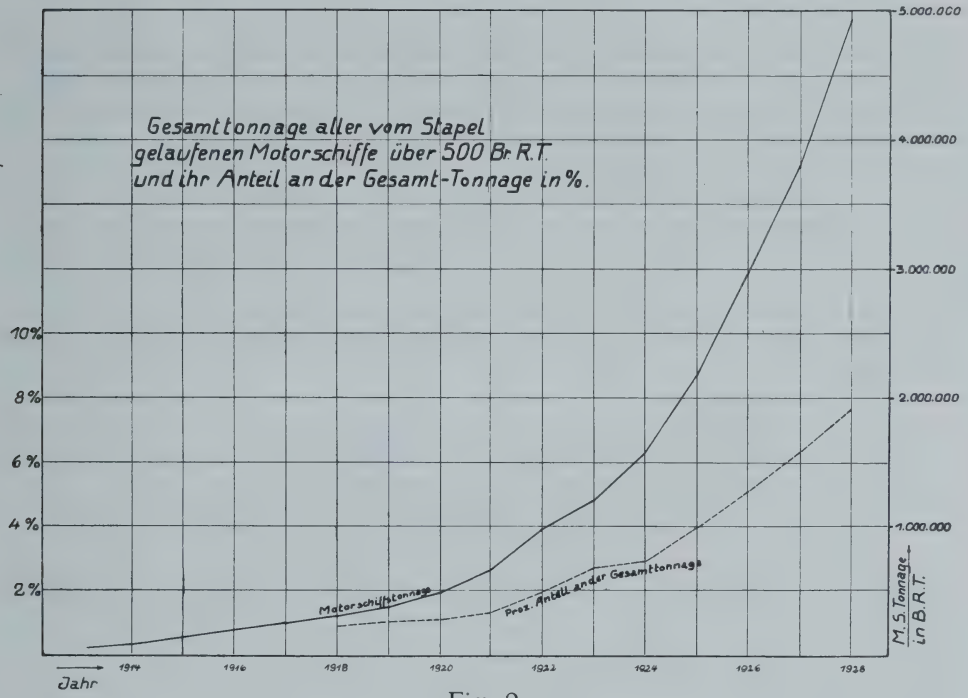


Fig. 2

Dieselmotors hätte sich doch wohl nicht so schnell vollzogen, wenn nicht auch die wirtschaftlichen Verhältnisse jener Zeit Reedereien und Werften gezwungen hätten, auf neuen Wegen und mit neuen technischen Einrichtungen aus der Misere herauszukommen, die nach der Hochkonjunktur in Schiffbau und Reederei einsetzte. Während des Krieges und in der Zeit der schwindelnd hohen Frachten und Schiffspreise unmittelbar nach dem Kriege lag für Reedereien und Werften kein besonderer Anlaß vor, den altbewährten Dampfantrieb für Frachtschiffe zu verlassen und durch die Konstruktion und Inbetriebnahme neuartiger Schiffsanlagen ein Risiko einzugehen. Damals hieß es nur, so schnell wie möglich Schiffe bauen und in Betrieb nehmen; ein hoher Gewinn war Reedern und Schiffbauern sicher. Bei dem Zusammenbruch dieser durch die Kriegs- und Nachkriegsverhältnisse erzeugten Hochkonjunktur erkannten die Reeder, daß bei dem Überangebot technich veralteter Tonnage nur mit den wirtschaftlichsten neuen Schiffen noch Gewinne erzielt werden konnten. Bei der Überzahl von Werften, der nun stark nachlassenden Bautätigkeit und der daraus folgenden schlechten Beschäftigung und Bezahlung der Werften versuchte eine Anzahl von Werften, durch den Bau hochwertiger Dieselanlagen einen Vorsprung vor der Konkurrenz zu erreichen und hoffte beim Bau derartiger Qualitätsschiffe höhere Preise zu erzielen als für Dampffrachtschiffe, die von jeder Werft gebaut werden konnten. Hinzu kam noch, daß in den Jahren nach dem Kriege die Bunkerkohlen sehr teuer waren und durch zahlreiche große Streiks

der Reeder das Vertrauen auf eine sichere Kohlenversorgung seiner Schiffe verloren hatte. Die Folge aller dieser günstigen Vorbedingungen für die Einführung des Dieselmotors und die Überwindung der besonders in der Schiffahrt starken Widerstände bei der Einführung von technischen Neuerungen war, daß der Bau von Dieselschiffen seit jener Zeit fast etwas Mode geworden ist. Sicher ist manches Dieselmotorschiff bestellt worden, ohne daß sich die Reederei ein klares Bild darüber gemacht hat, ob auch wirklich für den vorliegenden Zweck das Dieselschiff wirtschaftlicher ist als ein mit modernster Maschine ausgerüstetes Dampfschiff. Manche der noch vor einigen Jahren günstigen Bedingungen für den Bau von Dieselschiffen gelten heute nicht mehr, so z. B. der ungünstige Kohlenpreis im Verhältnis zum Ölpreis, und im Bau der Dampfmaschine sind seitdem erhebliche Fortschritte gemacht worden. Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit muß heute daher besonders sorgfältig durchgeführt werden.

Gang des Vergleichs

Schema für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit von Dieselmotorschiff und Dampfschiff mit Kohlenfeuerung

I. Vergleich der Maschinenleistung und Geschwindigkeit.
- A. Schraubenzahl.
- B. Probefahrtsleistung:
  - a) voll beladen,
  - b) leicht beladen.
- C. Reisegeschwindigkeit.

II. Vergleich der Unkosten.
- A. Betriebsmaterialien (Brennstoff, Schmieröl, Reserveteile, Reparaturen).
- B. Betriebslohn (Maschinenpersonal).
- C. Generalunkosten (Verzinsung, Amortisation, Versicherung).

III. Vergleich der Verdienstmöglichkeiten.
- A. Tragfähigkeit.
- B. Laderaum.

I. Vergleich der Maschinenleistungen und der Geschwindigkeit

A. Schraubenzahl.

Es muß zunächst untersucht werden, welche der beiden Antriebsarten eine Teilung der Maschinenleistung auf zwei Maschinen und Schrauben erforderlich oder vorteilhaft macht, da ein Doppelschraubenschiff in mancher Hinsicht andere wirtschaftliche Eigenschaften besitzt als der Einschrauber.

Vorteile des Einschraubenschiffes.

a) Billiger und leichter.
b) Weniger Bedienung, Reparaturen, Reserveteile.
c) Die Möglichkeit, durch Propellerleitvorrichtungen den Propellerwirkungsgrad wesentlich zu erhöhen.
d) Gewinn an Laderaum durch Fortfall eines Wellentunnels.
e) Auf Frachtschiffen mit Passagiereinrichtung günstigere Ausnutzung der Decks durch schmaleren Maschinenschacht.

Vorteile des Doppelschraubenschiffes.

a) Betriebsreserve.
b) Bessere Manövrierfähigkeit.
c) Günstigere Stabilität.
d) Möglichkeit, höhere Drehzahl bei gleichem Wirkungsgrad ausführen zu können, wenn kein Leitapparat beim Einschrauber vorgesehen wird.
e) Bessere Tauchung der Schrauben bei leichter Beladung, besonders im Seegang.

Die Vorteile des Doppelschraubenschiffes b und c sind für Frachtschiffe nicht sehr wichtig und d ist nur ein bedingter Vorteil, dessen Voraussetzung bei der immer stärkeren Verbreitung der Schraubenleitflächen nur selten erfüllt ist.

Die Einschraubenanordnung ist also für große Frachtschiffe vorteilhafter als die Doppelschraubenanlage. Heute wird wohl kein großer Frachtdampfer mehr als Doppelschraubenschiff ausgeführt, dagegen noch eine große Anzahl von Dieselmotorschiffen. Der Grund hierfür liegt darin, daß beim Dieselmotorschiff kurze Betriebsstörungen doch häufiger vorkommen können, als bei der Dampfkolbenmaschine und Dampfturbine und daß deswegen der Reeder aus Sicherheitsgründen eine Doppelschraubenanlage für Dieselmotoren verlangt. Außerdem ist es mit einfach wirkenden Maschinen nicht möglich, große Leistungen, wie sie heute für schnelle Linienfrachtschiffe verlangt werden, in 4—6 Zylindern unterzubringen, so daß man bei der Ausführung als Einschraubenanlage eine Maschine mit 8—10 Zylindern wählen muß, die einen sehr langen Maschinenraum bedingt. Aus diesem Grunde hat man bei Dieselmaschinen vielfach die Nachteile einer Doppelschraubenanlage in Kauf genommen. Die heutige Entwicklung mildert durch immer größere Betriebssicherheit und die Einführung des doppeltwirkenden Motors diese beiden Schwierigkeiten und begünstigt die Einführung der Einschraubenanlage auch auf Dieselschiffen hoher Geschwindigkeit.

Die Bewertung der genannten Vorteile ist beim Dampfschiff und Dieselschiff und in jedem einzelnen Fall verschieden und richtet sich ganz nach den Betriebsverhältnissen. Als Beispiel sei erwähnt, daß ein Schiff, das sehr oft in Ballast oder in leichter Beladung fährt, günstigere Fahrtergebnisse mit Doppelschrauben haben kann, obgleich für das voll beladene Schiff propulsionstechnisch das Einschraubenschiff mit Propellerleitvorrichtung am günstigsten ist. Es ist also sehr wohl denkbar, daß man für einen Vergleich beim Dampfschiff eine Enschraubenanlage zugrunde

legen muß, während für ein Dieselschiff der obige Vorteil in Verbindung mit den übrigen ausschlaggebend für die Wahl einer Doppelschraubenanlage sein kann.

B. Probefahrtsleistung.

Für den Vergleich müssen Maschinenleistungen zugrunde gelegt werden, die unter Berücksichtigung des Propellerwirkungsgrades für den am häufigsten vorkommenden Belastungstiefgang gleiche Reisegeschwindigkeiten ergeben. Es dürfen also nicht für den Vergleich zwischen Dampf- und Dieselschiff ohne weiteres gleiche Wellenpferdestärken angenommen werden. Auch die aus gleichen Probefahrtsgeschwindigkeiten abgeleiteten Maschinenleistungen sind für den Vergleich nicht gleichwertig, da hierfür die Reisegeschwindigkeit in Frage kommt. Die Fragestellung lautet also: Wie groß muß die Wellenleistung einer Ein- oder Doppelschraubendieselanlage sein, wenn damit für gegebene Verdrängung und Tiefgang die gleiche mittlere Reisegeschwindigkeit erzielt werden soll, wie mit der Dampfanlage. Die Frage ist sehr verwickelt und kann nur einwandfrei auf Grund langer Erfahrungen gelöst werden.

Man muß zunächst von der Probefahrtsleistung ausgehen.

a) Voll beladen.

Dieselmotoren für große Frachtschiffe werden mit etwa 50 % höherer Drehzahl ausgeführt als Kolbendampfmaschinen und Turbinen mit Übersetzungsgetriebe. Für einen Frachtdampfer, dessen Kolbenmaschine etwa 70 Umdrehungen macht, wird man einen Motor von etwa 100 Umdr./Min. wählen, falls er ein Einschraubenschiff ist und beim Doppelschraubenschiff vielleicht auf etwa 125 Umdrehungen hinaufgehen. Man kann selbstverständlich die Dieselmotoren auch mit geringerer Drehzahl ausführen, doch würden dann durch die Vergrößerung der Zylinderdurchmesser und des Hubes die Abmessungen und Gewichte der Motoren und damit auch ihre direkten und indirekten Kosten so groß, daß das Dieselschiff eine große Einbuße an Wirtschaftlichkeit erleidet. Man führt daher Dieselmotoren für Frachtschiffe mit etwa 90—125 Umdrehungen aus, während große Dampffrachtschiffe etwa 65—85 Propellerumdrehungen in der Minute aufweisen. Die langsam laufenden Propeller der Dampfschiffe haben einen günstigeren Wirkungsgrad als die schneller laufenden der Dieselmaschine, besonders beim Einschraubenschiff.

Genaue Werte hierüber zu geben ist nicht möglich, da sich selbstverständlich dieser Unterschied ganz nach der Güte der Propellerkonstruktion richtet. Die Kurven (Fig. 3) können daher nur die grundsätzliche Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades der Propulsion und dessen ungefähre Größenordnung zeigen. Man erkennt an den beiden Kurven auch, daß für hohe Drehzahlen das Zweischraubenschiff im Gesamtwirkungsgrad überlegen ist, während es bei geringen Drehzahlen etwas dem Einschraubenschiff nachsteht. Hierbei sind aber keine Propellerleitvorrichtungen angenommen, die den Gesamtwirkungsgrad des Einschraubenschiffes um etwa 8—15 %, den des Zweischraubenschiffes vielleicht nur um 2—5 % heben.

b) Leicht beladen.

Die in den Kurven zum Ausdruck gebrachte Relativität der Schraubenwirkungsgrade gilt aber nur für gut untergetauchte Propeller und für Wetterverhältnisse,

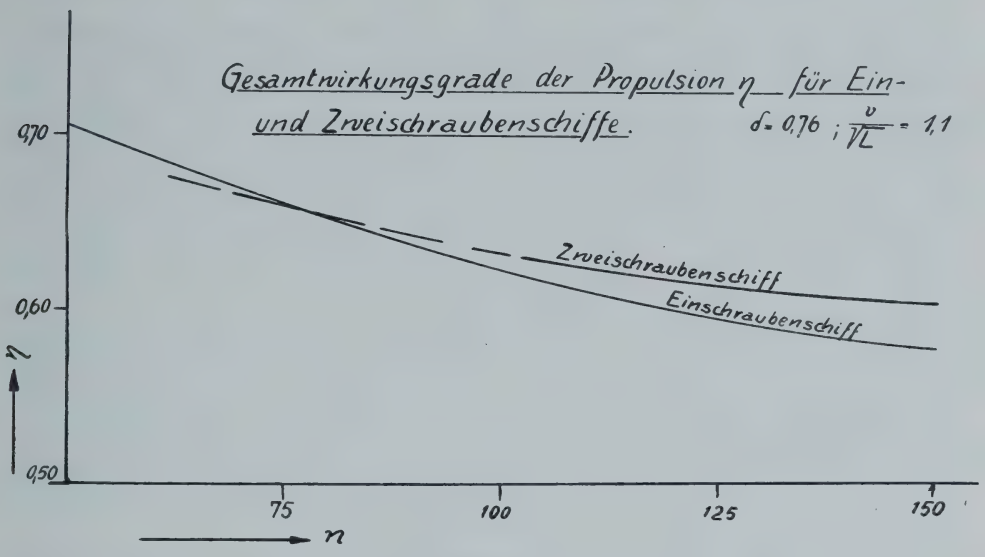


Fig. 3

bei denen die Schrauben nicht bei den Bewegungen des Schiffes aus dem Wasser austauchen. Bei geringer Beladung und Seegang wird die Überlegenheit des langsam laufenden Propellers über den schnellaufenden noch größer sein und andererseits wiederum die Überlegenheit des Doppelschraubenschiffes über das Einschraubenschiff, weil bei diesem die Propeller besser untergetaucht sind.

Hieraus ergibt sich, daß eine schnellaufende Maschine auf der Probefahrt in ruhigem Wasser und mit voll beladenem Schiff vielleicht die gleiche Geschwindigkeit erzielt, wie eine langsam laufende Maschine, daß aber die Geschwindigkeit des Schiffes mit der schnellaufenden Maschine bei leichterer Beladung und bewegter See erheblich geringer sein kann.

C. Reisegeschwindigkeit.

Die Betriebsverhältnisse eines Frachtschiffes auf einer längeren Seereise sind ganz verschieden von denen der Probefahrt. Diese veränderten Betriebsverhältnisse wirken sich auf die Reisegeschwindigkeit bei Dampfantrieb mit Kohlefeuerung und Dieselantrieb ganz verschieden aus. Beim ersteren erfolgt die Speisung der Kraftanlage mit Brennstoff durch Menschenhand, beim Dieselschiff maschinell durch die Brennstoffpumpe. Beim Dampfer ist also die Menschenarbeit ein Glied in dem Vorgang der Krafterzeugung, die Leistung der Kraftanlage somit abhängig von der Leistung der menschlichen Hand. Beim Dieselmotor hingegen gehört die Tätigkeit des Menschen nicht in den Arbeitsvorgang, sondern der Mensch überwacht, sichert und regelt ihn nur. Hierbei kommt weniger die körperliche Arbeitsleistung als die Aufmerksamkeit und Geschicklichkeit der überwachenden Menschen zur Geltung. Hier ist nicht die Leistung der Kraftmaschine, sondern ihre Betriebssicherheit abhängig

von Menschenhand und Menschengeist. Dies ist der wesentlichste betriebstechnische Unterschied zwischen kohlegefeuerter Dampfmaschine und Dieselmotor. Die Dampfmaschine wird daher immer abhängig sein von der Leistung des Heizer- und Trimmerpersonals. Schlechte Heizer, die bei dem starken Wechsel gerade dieses Personals häufig in Kauf genommen werden müssen, holen durch mangelnde körperliche Eigenschaften, mangelnden Fleiß, Übung und Aufmerksamkeit nicht das aus der Anlage heraus, was der Konstrukteur zugrunde gelegt hat. Aber auch die Leistung guter Heizer und Trimmer kann durch Seekrankheit, starke Hitze, schweres Arbeiten des Schiffes im Seegang so herabgemindert werden, daß die Leistung der Maschine unter die Konstruktionsleistung sinkt.

Ein mit Kohle gefeuerter Kessel wird seine volle Dampfleistung nur solange erzielen, wie die Kesselfeuer einwandfrei brennen. Bei Verschlackung der Roste geht die Leistung zurück. Es müssen daher meistens auf jeder Wache einmal die Feuer gereinigt werden. Hierbei geht durch die Störung des Verbrennungsvorganges, und durch die kalte Luft, die durch die offenen Feuertüren einströmt, die Kesselleistung erheblich zurück und ein entsprechender Abfall der Drehzahl und Geschwindigkeit ist bei jedem Feuerreinigen zu verzeichnen. Auch dieses vermindert die Reisegeschwindigkeit gegenüber der Probefahrtsgeschwindigkeit.

Die volle Kesselleistung kann nur erzielt werden mit einer Kohle von der Beschaffenheit, wie sie der Konstrukteur der Maschinenanlage bei der Bemessung der Rost- und Heizfläche zugrunde gelegt hat. Es ist aber bei einem Dampfschiff sehr oft nicht möglich, derartige Bunkerkohle zu bekommen und man muß mit einer minderwertigeren Kohle vorlieb nehmen, wobei es oft gar nicht möglich ist, diese Minderwertigkeit beim Einkauf zu erkennen. Beim Vergleich von Dampfschiff und Dieselschiff muß daher eine so bemessene Kesselanlage zugrunde gelegt werden, daß die erforderliche Leistung mit der am häufigsten benutzten Bunkerkohle sicher erreicht wird.

Das kohlegefeuerte Dampfschiff hat also im Vergleich zum Dieselschiff folgende Nachteile, die die Reisegeschwindigkeit gegenüber der Probefahrtsgeschwindigkeit herabsetzen:

1. Verminderte Leistung durch schlechtes Heizerpersonal.
2. Verminderte Leistung des Heizerpersonals durch Witterungseinflüsse.
3. Abfall der Geschwindigkeit durch das Feuerreinigen.
4. Verminderte Maschinenleistung durch schlechte Kohle.

Das Maß der Verminderung kann nur vom Reeder auf Grund von Erfahrungen gefunden werden.

Da die Leistung des Dieselmotors durch schweres Wetter nicht vermindert wird, kann das Dieselschiff in vielen Fällen noch mit voller Kraft fahren, wenn der Dampfer dies nicht mehr kann. Sein Schiffskörper muß daher noch mehr mit Rücksicht darauf konstruiert werden, daß er für die Fahrt gegen schwere See geeignete Formen und genügende Festigkeit besitzt, um den Vorteil der Maschinenleistung auch in schwerem Wetter voll ausnutzen zu können. Hieraus folgen: schärfere Linien und dadurch verminderte Tragfähigkeit, größerer Sprung oder größere Back und lokale Verstärkungen des Vorschiffes, Unterschiede gegen den Schiffskörper des Dampfschiffes, die auch die Wirtschaftlichkeit beeinflussen.

Man kann für den Vergleich den wesentlich größeren Verlust des Dampfers von der Probefahrtgeschwindigkeit gegenüber dem Motorschiff dadurch ausgleichen, daß man eine um so viel stärkere Maschine einbaut, daß der Verlust an der Reisegeschwindigkeit durch eine höhere Grundgeschwindigkeit ausgeglichen wird, wodurch natürlich Betriebs- und Anlagekosten wesentlich wachsen, oder man muß für das Dampfschiff eine geringere Reisegeschwindigkeit annehmen. Ob letztere Annahme zulässig ist, hängt von kaufmännischen Überlegungen ab. Gerade die Möglichkeit, hohe und gleichmäßige Reisegeschwindigkeiten erreichen zu können, hat die Anwendung des Dieselmotors für schnelle Linienfrachtschiffe besonders begünstigt. Die Bewertung gleichmäßiger Reisegeschwindigkeit für die Wirtschaftlichkeit läßt sich rechnerisch gar nicht erfassen, sie unterliegt der gefühlsmäßigen Beurteilung durch den Kaufmann, der dadurch in die Lage versetzt wird, für Schiff und Ladung genauere Dispositionen treffen zu können, als beim Dampfschiff.

Der Kompromiß, den Schiffbauer und Reeder zwischen den vorgenannten Eigenschaften finden, führt schließlich dazu, daß für Dieselantrieb und Dampfantrieb zwei Schiffsentwürfe entstehen, die dann weiter auf Unkosten und Verdienstmöglichkeiten untersucht und verglichen werden sollen.

II. Vergleich der Unkosten

Die unmittelbaren Betriebskosten setzen sich aus den Kosten für Betriebsmaterialien und Betriebslöhne zusammen. Von den mittelbaren oder Generalunkosten sollen nur Amortisation, Versicherung und Verzinsung berücksichtigt werden, da die übrigen Generalunkosten für die beiden Schiffsantriebe praktisch gleich sind und daher aus dem Vergleich herausfallen.

A. Betriebsmaterialien.

Überwiegend ist hier der Betriebsstoff für die Maschine, beim Dampfschiff Kohle, beim Dieselschiff Öl. Die Kosten hierfür sind abhängig vom verbrauchten Gewicht und dem Einheitspreis des Betriebsstoffes in dem Hafen, in dem er am billigsten übernommen werden kann.

Es ist der Verbrauch für eine Rundreise unter Annahme einer mittleren Reisegeschwindigkeit für jeden Schiffstyp zu ermitteln. Hierbei ist der Heizwert der in den Hafenplätzen erhältlichen Bunkerkohle zu berücksichtigen. Es ist ferner der Tiefgang des Schiffes zu berücksichtigen, da Reisegeschwindigkeit und Brennstoffverbrauch hiervon abhängig sind. Ferner ist die rein kaufmännische Frage zu untersuchen, ob es vorteilhaft ist, an einem günstigen Bunkerplatz Kohle oder Öl für eine größere Strecke mitzunehmen, als es seemännisch erforderlich ist, gegebenenfalls unter Verzicht auf entsprechende Ladungsmenge und Frachteinnahme. Diese Frage kann nur entschieden werden durch den Vergleich der durch die Mehrfracht erzielten Nettoeinnahme zum Verlust durch ungünstigeren Brennstoffeinkauf an einem anderen Bunkerplatz. Man sieht hieraus, daß ein einwandfreier Vergleich zwischen den wirklichen Brennstoffkosten von Kohlenschiff und Dieselschiff nur möglich ist, wenn man eine ganz bestimmte Rundreise unter ganz bestimmten Annahmen für die Beladung, Frachtsätze usw. zugrunde legt. Diese Annahme wird bei

einem Trampschiff aber nur in den seltensten Fällen der Wirklichkeit entsprechen, da beim Trampschiff diese Verhältnisse fast auf jeder Reise wechseln. Die Frage, ob Dampf- oder Dieselantrieb vorteilhafter ist, kann schlüssig überhaupt nur für das Linienschiff auf einer ganz bestimmten Route und auch nur für eine kurze Zeitspanne beurteilt werden. In erster Linie entscheidet natürlich neben der Verbrauchsziffer der Brennstoffpreis an den Bunkerplätzen, an denen das Schiff am vorteilhaftesten bunkert.

Die Ölpreise werden durch die großen Öltrusts festgesetzt, doch kann eine Reederei unter Umständen durch größere langfristige Abschlüsse günstige Preise erzielen. Die Kohlenpreise sind stärkeren Schwankungen unterworfen und die Qualität der Kohle ist nicht so einheitlich wie die Qualität der Öle. Die beigefügte Tabelle 5 (aus „Fairplay") gibt Preise für Bunkerkohle und Dieselöle für eine Anzahl Häfen. Sie erhebt nicht den Anspruch auf unbedingte Zuverlässigkeit, zeigt aber deutlich den starken Wechsel in der Relativität der Öl- und Kohlenpreise in den verschiedenen Häfen.

Der Verbrauch für eine gewisse Fahrstrecke wird entscheidend beeinflußt durch den Verbrauch für eine effektive Pferdestärke. Bei den Ölmotoren sind die Schwankungen in dieser speziellen Verbrauchsziffer verhältnismäßig gering. Man wird für Frachtschiffe, bei denen die Hilfsmaschinen für den Schiffsbetrieb keine große Rolle spielen, einen Mittelwert von 0,2 kg/pro PSe×Stunde einschließlich aller Hilfsmaschinen, Verluste usw. annehmen können, eine Zahl, die natürlich für einen exakten Vergleich mit einer bestimmten Maschinenart noch genauer erfaßt werden kann. Die spezifische Verbrauchsziffer für Dampfanlagen ist erheblich größeren Schwankungen unterworfen, weil selbst bei der Annahme einer gleichwertigen Kohle die heute gebräuchlichen Dampfantriebsmaschinen, nämlich Dreifach-Expansions-Naßdampfmaschine, Dreifach-Expansions-Heißdampfmaschine, Lentz-Einheitsmaschine, Dreifach-Expansionsmaschine mit Zusatzmaschine, System Bauer-Wach, und Turbinenantrieb mit Übersetzungsgetriebe verschiedene spezifische Verbrauchsziffern aufweisen. Die neuerdings zunächst versuchsweise eingeführten Dampfanlagen mit wesentlich erhöhtem Dampfdruck gestatten eine weitere Vergrößerung der Ökonomie, doch sollen diese Anlagen, da sie noch nicht aus dem Versuchsstadium heraus sind, zunächst nicht berücksichtigt werden. Man sollte annehmen, daß der ökonomischste der oben aufgezählten Dampfantriebe in allen Fällen bevorzugt werden würde, so daß man für den Vergleich nur mit dieser geringsten Verbrauchsziffer rechnen kann. Dies trifft aber nicht zu, da andere betriebstechnische Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme mitbestimmend bei der Wahl des Maschinentyps sind. In der Kohlen- und Erzfahrt über kürzere Strecken z. B. ziehen die Reeder heute noch die weniger ökonomische Naßdampfmaschine der Heißdampfmaschine vor, weil bei der Heißdampfanlage mehr Reparaturen und Überholungsarbeiten erforderlich sind als bei der Naßdampfanlage und die Hafenliegezeit dieser Schiffe so kurz bemessen ist, daß für diese Arbeiten keine Zeit vorhanden ist. Außerdem finden diese Schiffe, insbesondere die Kohlenschiffe, so billige Bunkerkohle, daß die Ersparnisse von einigen Tonnen Kohle bei den verhältnismäßig kurzen Reisen die Verlängerung an Hafenliegezeit und etwaige unvorhergesehene Verzögerung in der Abfertigung der Schiffe durch Reparaturen bei weitem nicht aufwiegen.

Für den Vergleich muß man sich also zunächst einmal über die Wahl des Systems des Dampfantriebs klar sein. Mit dem Dieselschiff werden Naßdampfmaschinen kaum in Konkurrenz treten, da für die eben geschilderten Anwendungsmöglichkeiten der Naßdampfmaschine in der Kohlenfahrt und auf kurzen Seestrecken das Dieselschiff aus anderen Gründen nicht rentabel ist und wenigstens heute noch nicht in Frage kommt. Wir wollen daher für unsere Betrachtungen, da es sich hier mehr um grundsätzliche Fragen, weniger um quantitative Vergleiche handelt, die normale Naß- und Heißdampfkolbenmaschine und den Turbinenantrieb ausscheiden und nur die ökonomischsten Dampfantriebe, nämlich Lentzmaschine und Bauer-Wach-System, zugrunde legen.

Für die Lentz-Ventilmaschine soll entsprechend einem mittleren Kohlenverbrauch von 0,52 kg PSi 0,58 kg für eine PSe und bei Bauer-Wach 0,5 kg PSe angenommen werden. Unter Berücksichtigung des spez. Verbrauchs kann bei gleichen Preisen für eine PSe-Stunde der Ölpreis bei der Bauer-Wach-Anlage 2,5mal, bei der Lentzanlage 2,9mal so groß sein als der Kohlenpreis. Steigt er darüber, so ist das Öl eine teurere, liegt er darunter, so ist es eine billigere Betriebskraft. Dies gilt aber nur für die Erzeugung einer PSe-Stunde, nicht etwa für die gesamte Wirtschaftlichkeit des Schiffes. Dieses Verhältnis ist nun in den Häfen sehr verschieden, wie die Tabelle zeigt.

Neben dem Verbrauch auf See werden im Hafen noch Kohlen verbraucht, und zwar für den Betrieb der im Hafen laufenden Hilfsmaschinen, bei einem Frachtdampfer also in erster Linie der Ladewinden und ferner bei einem Dampfschiff, dessen Aufenthalt in einem Hafen so kurz ist, daß die Feuer nicht ausgehen, für das Durchhalten der Kesselfeuer; im anderen Falle zum Anheizen der Kessel. Die Verbräuche für die elektrisch angetriebenen Hilfsmaschinen des Dieselschiffs sind sehr gering, da der Gesamtwirkungsgrad der elektrischen Ladewinden einschließlich des Generators trotz mehrmaliger Kraftumsetzung durch den hohen Wirkungsgrad der elektrischen Maschinen sehr günstig ist. Dampfhilfsmaschinen, insbesondere die Dampfladewinden, sind hingegen große Dampf- und Kohlenfresser, da die Dampfantriebsmaschinen hierfür aus Gründen der Einfachheit unökonomisch sind und die starke Strapazierung dieser Maschinen den Dampfverbrauch durch Undichtigkeit usw. sehr bald noch steigert. Auch ist der Verlust durch die langen Rohrleitungen über Deck sowie durch den intermittierenden Betrieb sehr groß, zumal auf den meisten größeren Frachtdampfern keine besondere Kesselanlage, die den Verhältnissen der Hilfsmaschinen angepaßt ist, vorhanden ist. Die spezifischen Brennstoff-Verbrauchszahlen für Dampfladewinden sind ganz unbestimmt, mögen aber nach Gewicht vielleicht den zehnfachen Betrag guter Hauptdampfmaschinen und das Zwanzigfache des Verbrauchs elektrischer Windenanlagen erreichen. Trotzdem spielt der erhöhte Verbrauch der Hilfsmaschinen beim Dampfer für die Gesamtwirtschaftlichkeit keine große Rolle, was folgendes überschlägige Beispiel zeigt:

Aus einem Schiff seien 8000 t Ladung mit eigenem Geschirr zu löschen. Die mittlere Hubhöhe soll 6 m betragen. Dann ist die gesamte Arbeitsleistung 48 000 mt oder rd. 175 EPS×Std. Setzt man nun den Gesamtwirkungsgrad bezogen auf die indizierte Leistung unter Berücksichtigung der Leerlaufarbeit beim Fieren und des Horizontaltransportes mit schätzungsweise nur 0,3 ein, so erhält man eine indizierte

Leistung von 580 PSi×Std. Beim Verbrauch von 5 kg je PSi gibt dies einen Kohlenverbrauch von nur rd. 3 t. Setzt man, unter der Annahme, daß der Dampfer aus Leichtern seine Ladung übernimmt, einen gleichen Verbrauch für das Beladen des Schiffes ein, so erhält man nur 6 t Kohlenverbrauch für das Lösch- und Ladegeschäft einer halben Rundreise. Da bei großen Schiffen mit längerer Reise die Lade- und Löscharbeit verhältnismäßig selten ist, besonders da noch sehr oft mit Kränen an Land gearbeitet wird, so spielt der Brennstoffverbrauch praktisch überhaupt keine Rolle.

Auch große Schiffe, die auf kurzen Strecken fahren, also in erster Linie Kohlen- und Erzschiffe, brauchen für das Löschen der Ladung selten eigene Winden, da hier große mechanische Löschanlagen an Land die Arbeit verrichten und das Beladen ohne Mithilfe des eigenen Geschirrs erfolgt. Nur bei Tourendampfern auf kurzen Fahrten, die viele Häfen anlaufen, also einen starken Ladungsumschlag im Verhältnis zur Seefahrtstrecke haben, können diese Ziffern etwas größere Bedeutung erlangen. Trotzdem wird auch hier die Wirtschaftlichkeit durch diese Verbräuche nicht wesentlich beeinflußt, denn sonst hätten längst die Reeder die Lösung angewendet, auf Dampfschiffen die Hilfsmaschinen elektrisch zu betreiben, zumal ja bei einem Dampfschiff die elektrische Primärstation durch Turboantrieb billig und einfach herzustellen ist. Wesentlicherer ist der Verbrauch für das Inbetriebhalten der Kesselanlage, insbesondere des Kessels, aus welchem die Dampfhilfsmaschinen gespeist werden, der bei einfacher Schicht beim Laden und Löschen zwei Drittel der Zeit unter Dampf gehalten werden muß, ohne daß eine nützliche Arbeit geleistet wird. Aber auch diese Verbräuche, die sehr von der Geschicklichkeit des Maschinen- und Heizerpersonals abhängen, fallen bei einem großen Dampfer mit seltenen und dann langen Hafenliegezeiten, bei denen man die Feuer ausgehen läßt, nicht sehr ins Gewicht. Nur bei solchen Schiffen, die im Verhältnis zur Hafenliegezeit geringe Seefahrtszeit haben und bei denen die Aufenthalte in den Häfen so kurz sind, daß man die Feuer nicht ausgehen lassen kann, sind diese Zahlen im Verhältnis zum Gesamtbetriebsstoffverbrauch größer. Sie können z. B. bei Personen- und Fährschiffen, die kurze Fahrtstrecken zurücklegen, so erheblich werden, daß hierdurch der Dieselantrieb, bei dem ja mit dem Augenblick des Abstellens der Maschine der Brennstoffverbrauch aufhört, vorteilhafter wird. Derartige Schiffe sollen aber nicht in den Rahmen der vorliegenden Studie hineingezogen werden, da wir uns hier mit großen Frachtschiffen zu befassen haben.

Vergleiche von Dampf- und Dieselfrachtschiffen nach obigen Richtlinien zeigen auf den meisten Strecken, daß die unmittelbaren Kosten für Brennstoff beim Dieselschiff höher sind als bei modernen Dampfschiffen mit Kohlenfeuerung. Die Größe dieses Unterschieds ist naturgemäß verschieden.

Die übrigen Betriebskosten für die Maschinen spielen keine ausschlaggebende Rolle; immerhin muß berücksichtigt werden, daß der Schmierölverbrauch für Dieselmaschinen ganz wesentlich höher als für Dampfmaschinen ist und daß auch besonders für Zylinderschmierung hochwertigeres Schmieröl angewendet werden muß.

Reparaturen durch Havarien, die nicht von der Versicherung getragen werden und durch normalen Verschleiß müssen in der Unkostenberechnung ebenfalls unter

Betriebsmaterialien verbucht werden. Zweifellos ist der Verbrauch an Reserveteilen und das Bedürfnis an kleineren Reparaturen beim Dieselmotor wesentlich größer als bei der Dampfmaschine.

Über den Verschleiß größerer Maschinenteile, der ja bei der Dampfmaschine verhältnismäßig gering ist, kann man bei der Dieselmaschine noch nichts Endgültiges sagen, da die Betriebsdauer moderner Dieselmaschinen noch zu kurz ist. Er hängt noch mehr wie bei der Dampfmaschine von der Gewissenhaftigkeit der Bedienung sowie von der Wahl geeigneter Brennstoffe ab. Hingegen muß der Fortfall der Kesselreparaturen und Kesselerneuerungen beim Dieselschiff als ein großes Plus bezeichnet werden, da bei längerer Betriebsdauer der Dampfschiffe die hierfür aufzuwendenden Beträge und Zeitverluste recht erheblich werden können. Man darf aber nicht nur allein die Reparaturen und den Verschleiß der eigentlichen Maschinenanlage in Betracht ziehen, sondern man muß diese Überlegungen auch auf die Hilfsmaschinen und den Schiffskörper ausdehnen. Die Reparaturen an Dampfhilfsmaschinen, insbesondere Winden, sind zwar relativ häufig, aber billig und können zum großen Teil vom Bordpersonal ausgeführt werden. Reparaturen der elektrischen Hilfsmaschinen hingegen sind bei der Kompliziertheit der elektrischen Maschinenelemente, insbesondere der Schaltapparate, sehr teuer und können nur von geübtem Werftpersonal, unter Umständen sogar nur von einer Spezialfirma vorgenommen werden. Eine Übersicht über Häufigkeit und Umfang dieser Reparaturen kann der Reeder nur an Hand einer längeren Erfahrung gewinnen.

Die Quelle für Reparaturen am Schiffseisenwerk ist bei Dampfschiffen der Kesselraum, weil hier durch Wärme in Verbindung mit Feuchtigkeit die stärkste Korrosion der Schiffsverbände, insbesondere im Doppelboden, stattfindet. Auch die Kohlenbunkerwandungen unterliegen durch mechanische Beanspruchungen, durch das Abscheuern des Schutzanstriches und die mit der Kohle in das Schiff gelangende Feuchtigkeit in Verbindung mit der Wärme schneller Zerstörung, so daß hierfür große Aufwendungen zu machen sind. Beim Dieselschiff hingegen fällt nicht nur die starke Wärmequelle fort, sondern das Öl der Bunker konserviert das Eisen in der denkbar besten Weise, so daß die Lebensdauer der Eisenkonstruktion im Bereich des Maschinenraumes beim Dieselschiff wesentlich höher ist.

Wenn hingegen durch Havarie, Grundberührungen, Kollision usw. Reparaturen dieser ölführenden Schiffsteile, insbesondere der Ölzellen, im Doppelboden erforderlich sind, so sind diese teurer, nicht nur durch die an sich teurere Arbeit, öldichte Wandungen herzustellen, sondern in erster Linie dadurch, daß die Arbeiten in den ölführenden Bunkern insbesondere Doppelbodenzellen, Zuschläge zu den Löhnen, teure Arbeiten für Entleeren, Reinigen und Lüften der Zellen erfordern. In vielen Fällen wird allerdings die Versicherung diese Schäden zu bezahlen haben, und da die Versicherungsprämie für Dieselmotorschiffe nicht höher ist als für Dampfschiffe unter sonst gleichen Verhältnissen, wird der Reeder hierdurch nicht unmittelbar belastet, aber die längere Reparaturdauer beim Schiff mit ölführendem Doppelboden muß doch vom Reeder berücksichtigt werden. Grundberührung mit Bodenschaden gehören aber zu den am häufigsten vorkommenden größeren Havarien. Das Verlegen der Ölbunker aus dem Doppelboden in weniger gefährdete und leichter zu reparierende Teile des Schiffsraumes beeinflußt die ganze Konstruktion des Schiffes

und vermehrt die Gestehungskosten unter Verminderung von Raum und Tragfähigkeit In den später angeführten Vergleichstabellen ist angenommen, daß sich das Reparaturenkonto bei Dampfschiffen und Dieselschiffen die Waage hält, weil auch nur annähernd einwandfreie Vergleichszahlen hierfür fehlen. Vielleicht ist hierbei das Dieselschiff etwas zu günstig behandelt worden.

B. Betriebslöhne.

Da der wesentlichste betriebstechnische Vorteil des Motors der Fortfall der menschlichen Arbeit aus dem Vorgang der Krafterzeugung ist, ist auch der Bedarf an menschlichen Arbeitskräften beim Dieselschiff geringer. Da aber Dieselmotoren sorgfältiger bedient und überwacht werden müssen, erfordert das Dieselschiff zwar eine geringere Anzahl, aber intelligentere Bedienungsmannschaften, während beim Dampfer mehr, aber nicht so hochwertiges Personal erforderlich ist. Beim Dampfschiff also wenig leitendes und viel Unterpersonal, beim Dieselschiff viel leitendes und wenig Unterpersonal und wiederum höhere Anforderungen an beide Kategorien.

Kleine Dampfanlagen erfordern prozentual mehr leitende Leute als große. Die Anzahl der Heizer und Trimmer steigt fast proportional mit der Leistung der Maschine; die Anzahl der Maschinisten hingegen nur wenig.

Das gleiche gilt für die Dieselmaschine, so daß für kleine Schiffe die gesamten Betriebslöhne nicht nennenswert geringer sind als beim Dampfschiff. Bei großen Anlagen tritt eine merkbare Verminderung der Löhne durch den Fortfall der zahlreichen Heizer beim Dieselschiff ein. In den Kurven (Fig. 4) sind diese

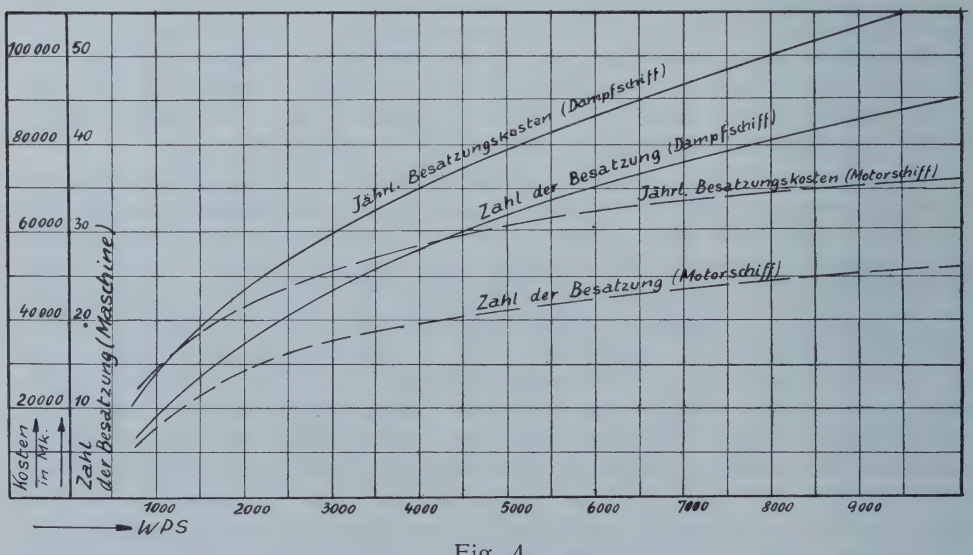


Fig. 4

Betriebslöhne für verschiedene Größen der Anlage zusammengestellt, wobei das höhere Gehalt der Dieselmaschinisten berücksichtigt worden ist. Diese Kurven, die natürlich nur einen Mittelwert darstellen, unterliegen aber noch Einflüssen, die sich zahlenmäßig nicht erfassen lassen. Das Angebot an guten Dieselmaschinisten ist wesentlich geringer, als das an Dampfschiffsmaschinisten, und deshalb wird trotz des Tarifs der Dieselmaschinist immer noch günstigere Anstellungsverhältnisse erreichen können, als der Dampfmaschinist. Da die Hafenarbeit des Maschinenpersonals beim Dieselschiff durch die Notwendigkeit sorgfältiger Maschinenrevision erheblich größer ist als beim Dampfschiff, wird das Überstundenkonto beim Dieselmotorschiff größer sein, und zum Ausgleich für den geringeren Urlaub, der dem Dieselmaschinisten gewährt werden kann, sind Gratifikationen und sonstige Entschädigungen vielfach üblich. Wie die Vergleichstabellen Nr. 2 und 3 zeigen, sind die Unterschiede in dem Besatzungsetat aber auch bei größeren Schiffen nicht so groß, daß sie die Gesamtwirtschaftlichkeit wesentlich beeinflussen könnten. Es sind hier wiederum zahlenmäßig nicht zu erfassende Vor- und Nachteile, die vielleicht wichtiger für den Reeder sind, als das reine Lohnkonto. Auf vielen Dampfern ist das Heizer- und besonders das Trimmerpersonal die Quelle großer Unannehmlichkeiten und Kosten. Gerade unter den Trimmern findet man Elemente, die durch Unzuverlässigkeit, Unzufriedenheit, dauernden Wechsel und Disziplinlosigkeit dem Reeder besonders im Auslande sehr viel Scherereien machen. Können doch z. B. ein paar Trimmer, die im Auslande vom Schiff desertieren, dem Reeder mehr Kosten verursachen, als der gesamte Besatzungsetat für die eine Reise beträgt. Das Unterpersonal auf Dieselschiffen hingegen steht intellektuell und auch moralisch meist bedeutend höher und setzt sich nicht aus Gelegenheitsarbeitern zusammen, sondern aus gelernten Berufsarbeitern, die in ihrem Berufe vorwärtskommen wollen. Dies gilt besonders für solche Reedereien, die das Unterpersonal zum größten Teil durch Assistenten ersetzen, die aus dieser Stellung später in die leitenden Stellungen aufrücken.

Die Schwierigkeit, für ein Dieselschiff Personal zu bekommen, das den wesentlich höheren Anforderungen gerecht wird, war anfangs wohl erheblich. Das Niveau der Seemaschinisten hebt sich aber in den meisten Ländern schnell und stetig, so daß heute bei der größeren Verbreitung des Motorantriebs zwar die Geeignetheit des Maschinenpersonals für den Dienst an der Dieselmaschine noch eine sehr wichtige Rolle spielt, aber von einer ernstlichen Personalschwierigkeit hier nicht mehr gesprochen werden kann. In solchen Ländern hingegen, in denen die Ausbildung und das ganze Niveau des Maschinenpersonals geringer ist, ist die Personalfrage noch ein Grund dafür, daß sich die Einführung des Dieselmotors in die Schiffahrt nur sehr langsam vollzieht.

C. Generalunkosten.

Von diesen Unkosten sollen nur Verzinsung, Amortisation und Versicherung in den Vergleich gezogen werden, da nur diese von den Baukosten abhängig und für die beiden Antriebsarten verschieden sind. Es ist schwer, allgemein gültige Prozentsätze dieser drei Unkostenbeträge vom Baupreis zu finden, da sie sich ganz nach den Betriebsverhältnissen des Schiffes und den kaufmännischen Maßnahmen des Reeders richten.

Als Unkosten soll eine Verzinsung der Baukosten mit dem Zinssatz für festverzinsliche Anleihen, also 7 %, in Rechnung gestellt werden.

Der Betrag der jährlichen Abschreibung wird bei hochwertigen Linienfrachtschiffen nicht durch die eigentliche Lebensdauer des Schiffes gegeben, sondern durch die Anzahl der Jahre, nach denen das Schiff für den Dienst der Reederei nicht mehr modern und wirtschaftlich ist und dann mit einer erheblichen Wertminderung verkauft werden muß. Es ist daher nicht möglich, die hierdurch erforderliche Abschreibung festzusetzen, da nicht übersehen werden kann, welche technische und wirtschaftliche Entwicklung in der Frachtschiffahrt uns noch bevorsteht. Es soll zum Vergleich nur eine Amortisation von 4 % angenommen werden.

Die Kaskoversicherungsprämie ist für ein Frachtschiff mit betriebssicherem Motor unter sonst gleichen Verhältnissen prozentual nicht höher als die eines Dampfschiffes. Sie richtet sich natürlich ganz nach den besonderen Verhältnissen und Fahrtbedingungen des Schiffes. Es soll hier zum Vergleich eine Kaskoversicherungsprämie von 5 % angenommen werden, so daß insgesamt für Verzinsung, Amortisation und Versicherung 16 % in den Vergleich einzusetzen sind.

Die Summe, die dieser Prozentsatz ergibt, stellt den größten Betrag der zu vergleichenden Unkosten dar, wie die Zusammenstellungen (Tab. 2, 3, 4) zeigen. Da sie vom Baupreis abhängt, ist die Ermittlung des Baupreises für Diesel- und Dampffrachtschiffe gleichwertiger Leistungen für den Vergleich von allergrößter Bedeutung. Hierbei müssen nicht nur die Herstellungskosten der eigentlichen Maschinenanlage, sondern die des gesamten Schiffes miteinander verglichen werden. Da trotz höherer Drehzahl der Motoren nur eine Anlage mit doppeltwirkendem Zweitaktmotor etwas leichter ist als eine moderne Dampfanlage ohne Kesselwasser und da ferner der Kilopreis für die ganze Dieselanlage wesentlich höher ist als für die Kolbendampfanlage mit dem besonders niedrigen Kilopreis für die Zylinderkessel, so muß der Gesamtpreis der Dieselanlage auch höher sein. Hinzu kommen Zuschläge für die elektrischen Schiffs-Hilfsmaschinen und die Ölbunkeranlage, so daß alles in allem das Dieselmotorschiff auch dann noch wesentlich teurer sein wird, wenn der leichtere doppeltwirkende Zweitaktmotor durch fabrikationsmäßige Herstellung billiger geworden ist.

In der Tabelle 1 sind Gewichte und Preise für ein Linienfrachtschiff und ein Trampschiff mit Kolbendampfmaschine System Lentz oder Bauer-Wach einerseits und drei verschiedenen Motorsystemen: Einfach-Viertakt, Einfach-Zweitakt, Doppelt-Zweitakt andererseits zusammengestellt. Auch hierfür lassen sich schwer Vergleichspreise gegenüberstellen, da, wenn eine und dieselbe Werft Alternativpreise für Schiffe gleicher Tragfähigkeit und Geschwindigkeit macht, nicht gewährleistet ist, daß die Schiffe tatsächlich auch gleiche Tragfähigkeit und Reisegeschwindigkeit haben. Die Tab. 1 zeigt, daß die Anschaffungskosten pro Tonne Tragfähigkeit von dem System des Dieselmotors abhängen und der doppeltwirkende Zweitaktmotor einen wesentlich billigeren Tonnenpreis ergibt als der Viertaktmotor. Durch die weiteren Fortschritte in der Erleichterung und Verbilligung des doppeltwirkenden Zweitaktmotors kann die Wirtschaftlichkeit der Dieselmotorschiffe noch verbessert werden. Die Entwicklung in dieser Linie ist wesentlich wichtiger als etwa eine

kleine Verminderung des Brennstoffverbrauchs, denn die Gesamtkosten für Brennstoffe sind im Verhältnis zu den drei genannten Posten der Generalunkosten gering.

Andererseits darf aber auch nicht übersehen werden, daß auch die Dampfmaschine sich weiter entwickelt, und durch die Einführung des hohen Druckes und der Wasserrohrkessel jedenfalls wesentliche Gewichtsersparnisse, wenn auch vielleicht zunächst noch keine Ersparnisse in den Anschaffungskosten gemacht werden können. Immer aber wird Verzinsung, Amortisation und Versicherung eine ausschlaggebende Rolle spielen und es wird erforderlich sein, hierzu eine einwandfreie Baukostenermittlung anzustellen.

III. Verdienstmöglichkeiten

a) Tragfähigkeit.

Dem Vergleich der Anschaffungskosten ist zugrunde gelegt, daß Tragfähigkeit an dead weight und Laderaum bei beiden Antriebsarten durch verschiedene Schiffsabmessungen gleichgemacht sind. Es bleibt noch zu untersuchen, welcher Anteil der Tragfähigkeit an dead weight für Nutzladung übrigbleibt; mit anderen Worten, wie groß das Gewicht des Brennstoffes und der sonstigen Vorräte für eine bestimmte Reise bei beiden Antriebsarten ist. Zu diesem Zweck sind in der Tab. 1 auch die Brennstoffverbräuche für verschiedene Fahrtstrecken zusammengestellt worden. Das Motorschiff hat durch den geringeren Gewichtsverbrauch an Brennstoff und den Fortfall des Kesselspeisewassers eine wesentlich größere Nutzladefähigkeit; die Überlegenheit steigt naturgemäß mit zunehmender Maschinenleistung und Fahrtstrecke. Allgemein ist also das Dieselschiff für lange Fahrtstrecken ohne Zwischenbunkerung und für hohe Geschwindigkeit besonders im Vorteil. Für den Kaufmann handelt es sich nun darum, in welchem Umfange diese vermehrte Ladefähigkeit ausgenutzt werden kann und welchen Gewinn sie im Vergleich zu den höheren Betriebskosten des Dieselmotors bringt. Die kaufmännische Bewertung des technischen Vorteils größerer Ladefähigkeit ist somit vom Frachtangebot und dem Frachtsatz abhängig, woraus eine große Veränderlichkeit in dieser Bewertung je nach der Lage des Frachtenmarktes erfolgt. Nimmt man als Beispiel ein Linienfrachtschiff, das von Europa nach Übersee im regelmäßigen Dienst verkehrt, so wird für die Ausreise die vermehrte Tragfähigkeit selten von Wert sein, da derartige Schiffe ausgehend nur selten volle Ladung bekommen. Die geringere Belastung des Dieselschiffes durch Bunker und Vorräte kann sogar ein Nachteil sein, weil mit geringer Beladung oder dem reinen Ballastzustand schlechte Seeeigenschaften und Verminderung der Reisegeschwindigkeit verbunden sind. Das durch Kohlen und Wasser stärker belastete Dampfschiff wird in vielen Fällen sogar durch Bunkerung für Hin- und Rückreise seine Belastung noch weiter vermehren können. Wenn ferner das Motorschiff, wie meistens üblich, den größten Teil des Brennstoffvorrats im Doppelboden führt, so verliert es im Vergleich zum Dampfschiff außerdem noch den Wasserballast, den der Dampfer im Doppelboden führen kann. Zusätzliche Ballasttanks oder Verlegung der Brennstofftanks in den Raum sind daher erforderlich, wenn das Dieselschiff mit geringer Beladung oder in Ballast häufiger längere Seestrecken mit ungünstigen Wetterverhältnissen durchfahren muß.

Auf der Rückreise nach Europa wird das Schiff häufiger seine Tragfähigkeit voll ausnutzen können und daher der Vorteil des Dieselschiffes zur Auswirkung kommen. Hierbei muß aber wieder berücksichtigt werden, daß in zahlreichen Fällen das Dieselschiff seine Ölvorräte in Übersee wesentlich billiger ergänzen kann als in Europa, so daß es auf der Heimreise auch Brennstoff für die neue Ausreise mit an Bord führt, während das Dampfschiff mit Kohlenfeuerung günstiger in Europa bunkert und daher nur einfachen Bunkervorrat hat. In diesem Falle wird die Mehrtragfähigkeit des Dieselschiffes wieder wesentlich herabgesetzt.

Die Zusammenstellung Tab. 3 zeigt, daß bei voller Ausnutzung der Tragfähigkeit auf der Ausreise und der Heimreise das Dieselschiff besonders durch seine Mehrfrachteinnahme dem Dampfschiff wesentlich überlegen ist.

Bei vielen Frachtlinienschiffen ist aber auch dann die vermehrte Tragfähigkeit nicht ausnutzbar, wenn das Ladungsangebot hierfür genügt, weil es sich um leichte, viel Raum erfordernde Ladung handelt und das Schiff gar nicht auf Tiefgangsmarke kommt, wenn seine Räume voll sind. Es muß daher für „Räumte Schiffe" die absolute und relative Laderaumgröße beider Typen untersucht werden.

Der Raum für die Motoranlage wird im allgemeinen nicht viel kleiner sein als bei einer Dampfanlage. Nur beim doppeltwirkenden Zweitaktmotor werden auch hier Ersparnisse gemacht werden können. In der Hauptsache wird aber dann das Dieselschiff größere Räumte haben als das Dampfschiff, wenn die festen Bunker für lange Strecken bemessen werden müssen. Dieses absolute Mehr an Räumte ist für die meisten Linienfrachtschiffe sehr wertvoll.

Die relative Laderaumgröße hingegen, d. h. Räumte für eine Tonne Nutzlast, kann trotz der Vermehrung des absoluten Raumes durch die vermehrte Ladefähigkeit geringer sein als beim Dampfschiff. Die Bewertung des größeren Laderauminhalts des Dieselschiffes richtet sich also ganz nach dem Raumbedarf der häufigsten Ladungsarten, bezogen auf die Gewichtseinheit. Es wäre nun aber nicht richtig, wenn man beim Dampfschiff die geringere Ladefähigkeit für Leichtgut im Vergleich als ausfallende Frachteinnahme einsetzen würde. Wenn der Reeder den großen Frachtraum, der beim Dieselschiff erreicht wird, benötigt, der sich aber mit gleichem Schiffskörper beim Dampfschiff nicht erreichen läßt, so muß für den Vergleich der Laderaum des Dampfschiffes durch Vermehrung des Freibordes, der Aufbauten oder der Deckshöhe des Shelterdecks auf das gleiche Maß wie beim Dieselschiff vergrößert werden. Dies hat lediglich ein größeres Schiffseigengewicht und dadurch eine geringe Vermehrung des Deplacements und der Selbstkosten zur Folge, die sich natürlich wieder in den Unkosten mit kleinen Beträgen bemerkbar macht.

Zusammenstellung des Vergleiches

An drei Beispielen Tab. 2, 3, 4 ist der Vergleich nach den hier gegebenen Richtlinien durchgeführt, wobei die eingesetzten Zahlen in der Hauptsache die Größenordnung und die Relativität zeigen sollen. Die Zusammenstellungen zeigen, daß die Betriebsunkosten beim Dieselschiff wesentlich höher sind als beim Dampfschiff und bei den angenommenen Frachtsätzen der Gewinn an Tragfähigkeit auf der

Heimreise den Unterschied in den Betriebskosten nicht ausgleicht, so daß in den beiden angenommenen Fällen das Dieselschiff ungünstiger ist als das Dampfschiff.

Im dritten Beispiel ist das gleiche Linienfrachtschiff für die Fahrt nach Mexiko mit voller Ladung auch für die Ausreise angenommen. Hier zeigt das Dieselschiff eine wesentliche Überlegenheit.

Die hier geschilderten, durch Zahlen nicht ausdrückbaren Vorteile des Motorschiffes können natürlich in den Tabellen nicht berücksichtigt werden und verändern die Bewertung, die sich aus dem rein zahlenmäßigen Vergleich der Tabellen ergibt. Die letzte Entscheidung, ob Motorschiff oder Dampfschiff für den Zweck des Reeders vorteilhafter ist, kann deshalb in den Fällen, bei denen sich die Wirtschaftlichkeit beider Typen nähert, nur auf Grund subjektiver Bewertung dieser Vorteile getroffen werden, wobei aber doch der nach den hier gegebenen Richtlinien ausgeführte zahlenmäßige Vergleich diese subjektive Bewertung entscheidend beeinflussen dürfte.

Tabelle 1

Linienfrachtschiff, 8000 t d.w., v = 14 kn.

Antriebsart	WPS	γ V.	Gewichte in t: kg/WPS	Gewichte in t: gesamt	Gewichte in t: Schiffsrumpf	Gewichte in t: Schiff ohne Ladung	Preise: Mk/WPS	Preise: Maschine ges.	Preise: Schiffskörper	Preise: Zuschlag für E-Anlage	Preise: Gesamt	£ Sterl./t d. w.	Brennstoffverbrauch + 15 % Reserve, Fahrstrecke in Seemeilen: 2000	5000	7000	10000	Mindertragfähigkeit der Dampfschiffe, Fahrstrecke: 2000	5000	7000	10000
Dampf .	4250	12550	240	1020	2530	4550	240	1020000	1765000	—	2785000	17,4	[1] 352	880	1234	1760	257	642	902	1215
													[2] 408	1020	1428	2040	313	782	1096	1565
4 Takt D. M. . .	4500	12770	260	1170	3600	4770	380	1700000	1800000	50000	3550000	22,2								
2 Takt D. M. . .	4450	12440	205	912	3530	4440	340	1500000	1765000	50000	3315000	20,7	140	350	490	700	—	—	—	—
2 Takt dopp. w. D. M. . .	4450	12330	185	823	3510	4330	310	1400000	1755000	50000	3205000	20,0								
Trampschiff, 8000 t d.w., v = 11 kn.																				
Dampf .	2000	11400	250	500	2900	3400	250	500000	1390000	—	1890000	11,8	[1] 211	528	738	1055	151	378	527	755
													[2] 244	610	854	1220	182	460	683	982
4 Takt D. M. . .	2120	11520	265	560	2960	3520	410	870000	1420000	50000	2340000	14,7								
2 Takt D. M. . .	2100	11410	230	483	2925	3408	390	820000	1400000	50000	2270000	14,2	84,2	210	295	420	—	—	—	—
2 Takt dopp. w. D. M. . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—								

[1] Bauer-Wach-System.
[2] Lentz-Einheitsmaschine.

Tabelle 2

8000 t Linien-Frachtschiff, 14 Knoten
Hamburg—La Plata und zurück

	Dampf Bauer-Wach	Motor 4 Takt	Motor Doppeltw. 2 Takt
Ausgehend:			
Ladung . . . . . t	3 000	3 000	3 000
Kohlen hin und zurück, Öl hin . . . . t	2 000	350	350
Speisewasser usw. . . . . t	250	100	100
Belastung:			
WPS ausgehend für 14 Knoten Probefahrt	3 600	3 350	3 300
Seegeschwindigkeit	13,4	13,5	13,5
Reisedauer . . . . . Tage	18,6	18,4	18,4
Brennstoffverbrauch . . . . . t	820	282	279
Rückkehrend:			
Belastung . . . . . t	8 000	8 000	8 000
WPS	4 250	4 500	4 450
Seegeschwindigkeit	13,5	13,85	13,85
Reisedauer . . . . . Tage	18,4	18,0	18,0
Brennstoffverbrauch . . . . . t	950	370	366
Ganzer Reiseverbrauch ohne Hafen . . . t	1 770	652	645
Brennstoffkosten:			
Kohle . . . . . 19 M			
Öl . . . . . 90 M	33 500	59 000	58 000
Dauer der Rundreise 20 Tage Hafen . . .	57	56,4	56,4
Maschinenpersonal für eine Rundreise . M	12 800	10 700	10 700
Neubaupreis . . . . . M	2 785 000	3 550 000	3 205 000
16 % Verzinsung, Amortisation, Versicherung . . . . . M	447 200	565 000	510 000
Anteil für eine Rundreise . . . . . M	70 000	88 500	79 500
Vergleichsunkostensumme je Reise . . . M	116 300	158 200	148 200
Frachteinnahmen:			
Rückkehrend Brennstoff, Wasser . . . . t	1 300	450	445
Mehrladefähigkeit . . . . . t	—	850	855
Mehrfracht 25 sh netto	—	+ 21 500	21 625
Mehrunkosten . . . . . M	—	— 41 900	— 31 900
Verlust des Dieselschiffs je Reise . . . M	—	— 20 400	— 10 300
Verlust des Dieselschiffs im Jahr . . . M	—	— 132 000	— 66 500
in % des Anlagekapitals	—	— 3,7 %	— 2,1 %

Tabelle 3

8000 t Linien-Frachtschiff, 14 Knoten
Mexikofahrt, 6000 Seemeilen

	Dampf Lentz-Einheits	Motor 4 Takt	Motor 2 Takt
Ausgehend:			
Volle Ladung . . . . . t	8 000	8 000	8 000
WPS ausgehend	4 250	4 500	4 450
Seegeschwindigkeit	13,5	13,85	13,85
Reisedauer . . . . . Tage	18,4	18,0	18,0
Brennstoffverbrauch . . . . . t	950	730	366
Rückkehrend desgleichen	950	730	366
Ganzer Reiseverbrauch	1 900	740	732
Brennstoffkosten:			
950 t Kohle in Hamburg . . 19 M =	18 000		
950 t Kohle in Galveston . . 35 M =	33 500		
	51 500		
740 t Öl in Galveston . . . 42 M =		3 100	30 700
Dauer der Rundreise 20 Tage Hafen . . .	57	56,4	56,4
Maschinenpersonal für eine Reise . . . . M	12 800	10 700	10 700
Neubaupreis . . . . . M	2 785 000	3 550 000	3 205 000
16 % jährliche Verzinsung, Amortisation, Versicherung . . . . . M	447 200	565 000	510 000
Anteil für eine Rundreise . . . . . M	70 000	88 500	79 500
Vergleichsunkosten je Reise . . . . . M	134 300	130 200	12 100
Frachteinnahmen:			
Ausgehend:			
Brennstoff, Wasser . . . . . t	1 300	450	445
Mehrladefähigkeit . . . . . t	—	850	855
Mehrfracht 20 sh je t netto . . . . . t	—	17 000	17 100
Rückkehrend:			
Brennstoff, Wasser . . . . . t	1 300	900	890
Mehrladefähigkeit . . . . . t	—	400	410
Mehrfracht 25 sh netto . . . . . t	—	10 000	10 250
Summe der Mehrfracht . . . . . M	—	27 000	27 350
Minderunkosten . . . . . M	—	4 100	13 300
Gewinn des Dieselschiffs je Reise . . . M	—	31 100	40 650
Gewinn des Dieselschiffs im Jahr . . . M	—	201 000	262 000
in % des Anlagekapitals	—	5,7 %	8,2 %

Tabelle 4

8000 t Trampschiff, 11 Knoten
Hamburg—La Plata und zurück, 2 × 6000 Seemeilen

	Dampf Bauer-Wach	Motor 4 Takt	Motor 2 Takt
Ausgehend:			
Ladung . . . . . t	3 000	3 000	3 000
Kohle hin und zurück, Öl hin . . . . . t	1 200	200	200
Speisewasser usw. . . . . t	150	60	60
Belastung . . . . . t	4 350	3 260	3 260
WPS ausgehend für 11 Knoten Probefahrtsleistung	1 640	1 550	1 550
WPS ausgehend Seegeschwindigkeit . . .	10,4	10,7	10,7
Reisedauer . . . . . Tage	24,0	23,3	23,3
Brennstoffverbrauch . . . . . t	475	165	165
Rückkehrend:			
Belastung A . . . . . t	8 000	8 000	8 000
WPS 11 Knoten voll beladen	2 000	2 100	2 100
Seegeschwindigkeit	10,5	10,85	10,85
Reisedauer . . . . . Tage	23,7	22,9	22,9
Brennstoffverbrauch . . . . . t	570	220	220
Ganzer Reiseverbrauch ohne Hafen . . t	1 045	385	385
Brennstoffverbrauch:			
Kohle . . . . . 19 M			
Öl . . . . . 90 M	20 000	34 600	34 600
Maschinenpersonal pro Rundreise . . . M	12 600	11 000	11 000
Dauer der Reise 25 Tage Hafen . . . . M	72,7	71,2	71,2
Neubaupreis . . . . . M	1 890 000	2 340 000	2 270 000
16 % Jahresverzinsung, Amortisation, Versicherung . . . . . M	302 000	374 000	363 000
Anteil für eine Rundreise . . . . . M	60 000	73 000	71 000
Vergleichsunkostensumme je Reise . . . M	92 600	118 600	116 600
Frachteinnahmen:			
Rückkehrend Brennstoff, Wasser . . . . t	760	265	265
Mehrladefähigkeit . . . . . t	—	495	495
Mehrfracht 20 sh netto	—	+ 10 000	+ 10 000
Mehrunkosten . . . . . M	—	— 26 000	— 24 000
Verlust des Dieselschiffs je Reise . . . M	—	— 16 000	— 14 000
Verlust des Dieselschiffs im Jahr . . . M	—	— 82 100	— 71 800
in % vom Anlagekapital	—	3,5 %	3,2 %

Tabelle 5

Preiszusammenstellung

Häfen	Bunker-kole	Öl	Preis-ver-hältnisse
Galveston	35/7	42	1,17
Batavia	51	80	1,57
Constanza	34	58	1,68
Buenos Aires	48	90	1,88
Colombo	36	82/6	2,29
Philadelphia	26	61	2,34
Singapore	34	80	2,36
Alexandria	40	95	2,38
Rio	55/6	135	2,43
Madeira	34/6	86	2,50
Hongkong	30	80	2,67
Cape Town	36/6	100	2,74
Naples	31/6	95	3,02
Genoa	30	95	3,17
Sydney	26/2	85	3,25
Gothenburg	28	95	3,39
Gibraltar	27	95	3,52
Portland	25	90	3,61
London	23/6	90	3,73
Brixham	23/6	90	3,83
Hamburg	18/6	90	4,87
Danzig	15/3	80	5,25
Rotterdam	16—17	90	5,30
San Franzisko	—	33/6	—

Ein neues Verfahren zur näherungsweisen Lösung mehrdimensionaler Spannungsprobleme

Von Professor Dr. Ing. Gustav Flügel

In der Technik liegt sehr häufig die Notwendigkeit oder wenigstens das Bedürfnis zur Lösung mehrdimensionaler Spannungsprobleme vor, wie z. B. der Ermittlung der Spannungserhöhung infolge aller Arten von „Kerbwirkungen". Bei der üblichen Art der Behandlung solcher Aufgaben ist bekanntlich bereits in den einfachsten Fällen ein so großer mathematischer Aufwand erforderlich, daß ihm der Ingenieur normalerweise nicht gewachsen ist, während die in der Regel vorliegenden schwieriger gelagerten Fälle sich für diese Art der Behandlung meist als ganz unzugänglich erweisen. Zur Beseitigung dieser Schwierigkeiten ist im Nachfolgenden ein allgemein anwendbares Näherungsverfahren entwickelt, das sich auf die Verwendung krummliniger „natürlicher" Koordinaten stützt und das sich bereits zur Lösung von Strömungsproblemen bewährt hat[1]). Das Koordinatensystem ist hierbei vor allem so zu wählen, daß sich die Randbedingungen in mathematisch einfachster Weise erfüllen lassen. Im übrigen ist der zweckmäßigste Verlauf des Koordinatennetzes bei den verschiedenen Problemgruppen etwas verschieden.

Die nachfolgenden Entwicklungen beschränken sich vorerst auf die Behandlung von Stäben. Dabei wird als „Stab" ein Körper bezeichnet, dessen Breite klein ist im Vergleich zu seiner Länge, während seine Dicke wiederum im Vergleich zur Breite entweder klein (er kann dann als „dünner Stab" bezeichnet werden) oder von gleicher oder höherer Größenordnung („dicker Stab") sein kann. Eine Sonderstellung nimmt der „runde Stab" ein. Im folgenden soll unter Belastungsfall A lediglich der „dünne Stab" behandelt werden[2]), während bei Belastungsfall B (Torsion) nur die anderen Stabarten betrachtet werden.

A. Der durch Kräfte und Biegungsmomente belastete Stab

I. Die Grundlagen des Verfahrens

1. Geometrische Beziehungen: Es wird vorausgesetzt, daß es sich nur um ebene Belastungsfälle handle, daß also bei etwaiger Krümmung von Stäben diese nur in einer Ebene gekrümmt sind, in der auch alle angreifenden Kräfte und Momente wirken sollen. Die Querabmessung des Stabes in dieser Ebene heißt seine Breite, seine Abmessung senkrecht dazu ist die Dicke h, die etwas veränderlich sein kann (bei starker Veränderlichkeit von h würde statt eines mathematisch zweidimensionalen ein dreidimensionales Problem vorliegen, das nicht mehr behandelt werden soll).

Denkt man sich über die Breitseite des Stabes ein beliebiges krummlinig-rechtwinkliges Koordinatennetz gezogen, bei dem wir die eine Linienschar als die x-Linien, die dazu senkrechte als die y-Linien bezeichnen wollen, so möge zunächst festgesetzt werden, daß die Krümmung einer Linie positiv sei, wenn ihr Krümmungsmittelpunkt in positiver Richtung der anderen Linie liegt. Es gelten dann einige wichtige geometrische Beziehungen, die sich aus dem Schnittviereck $MNN'M'$ zweier sich senkrecht schneidender Linienpaare (Abbildung 1) unmittelbar ableiten

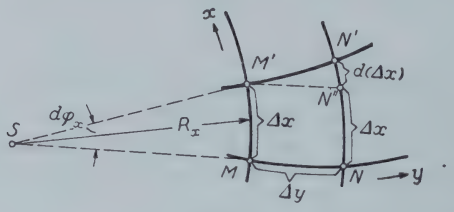


Abb. 1

lassen. Bezeichnet $\triangle x$ den Abstand zweier benachbarter y-Linien, so ist derselbe längs dieser Linien im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Cartesischen Koordinaten nicht konstant; es muß daher dieses $\triangle x$ als Variable behandelt werden. Das gleiche gilt für den Abstand $\triangle y$ zweier benachbarter x-Linien.

Aus Abbildung 1 ergibt sich zunächst, daß z. B. eine x-Linie bei einem unendlich kleinen Schritt $\triangle x = dx$ von M nach M' eine Richtungsänderung um den Winkel $d\varphi_x$ erfährt, für welchen aus dem Dreieck $MM'S$, wo S der Krümmungsmittelpunkt der x-Linie ist (R_x = Krümmungsradius) die Beziehung folgt

$$d\varphi_x = \frac{dx}{R_x}. \tag{1a}$$

Desgleichen ergibt sich für die y-Linien die Beziehung

$$d\varphi_y = \frac{dy}{R_y}. \tag{1b}$$

Beim Weiterschreiten von M nach N ändert sich der Abstand der beiden y-Linien um den Betrag

$$d(\triangle x) = \frac{\delta(\triangle x)}{\delta y}\, dy = N''N'.$$

Sind die beiden y-Linien unendlich benachbart (d. h. $\triangle x = dx$), so werden die Dreiecke $N''M'N'$ und $MM'S$ einander ähnlich und es ergibt sich dann die weitere Beziehung

$$\frac{d(\triangle x)}{dy} = \frac{\delta(\triangle x)}{\delta y} = -\frac{\triangle x}{R_x} = -\frac{dx}{R_x}. \tag{2a}$$

Die Gleichung läßt sich auch in der Form schreiben

$$\frac{d(\triangle x)}{\triangle x} = -\frac{dy}{R_x}.$$

Ihre Integration ergibt

$$V = \frac{\Delta x_I}{\Delta x} = \frac{dx_I}{dx} = e^{\int_{y_1}^{y} \frac{dy}{R_x}}, \tag{3a}$$

wobei $\Delta x_I = dx_I$ den Abstand der beiden unendlich benachbarten y-Linien in einem beliebig gewählten Ausgangspunkt I bedeutet. Es kann mit genügender Genauigkeit auch gesetzt werden

$$V = \frac{\Delta x_I}{\Delta x} = \infty \frac{\Delta' x_I}{\Delta' x}, \tag{3b}$$

wenn $\Delta' x$ bzw. $\Delta' x_I$ der Abstand zweier y-Linien mit endlicher, aber doch möglichst kleiner Entfernung bedeutet.

Ganz ähnlich werden auch für den Abstand $\Delta y = dy$ zweier unendlich benachbarter x-Linien die Beziehungen gefunden:

$$\frac{\delta(\Delta y)}{\delta x} = -\frac{dy}{R_y} \tag{2b}$$

$$V' = \frac{\Delta y_I}{\Delta y} = e^{\int_{x_1}^{x} \frac{dx}{R_y}} = \sim \frac{\Delta' y_I}{\Delta' y}. \tag{4}$$

2. Die Gleichgewichtsbedingungen: Unter Verwertung dieser geometrischen Beziehungen können nunmehr die Bedingungen für das Kräftegleichgewicht an dem Ausschnitt $MNN'M'$ (Abbildung 2) untersucht werden. An den

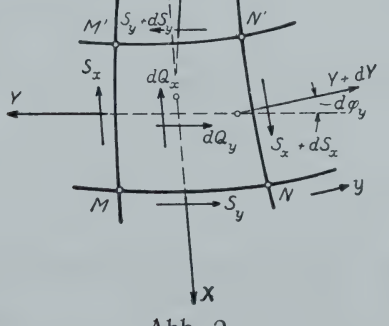


Abb. 2

vier zur Zeichenebene senkrechten Seiten des Elements (die beiden Stirnseiten sollen spannungsfrei sein) greifen folgende Kräfte an (σ_x und τ_x sind die Normal- bzw.

Schubspannungen in x-Richtung, σ_y und τ_y desgleichen in y-Richtung); an den Seiten MN und $M'N'$ die Normalkräfte X bzw. $X + dX$, ferner die Schubkräfte S_y bzw. $S_y + dS_y$; an den Seiten MM' und NN' die Normalkräfte Y bzw. $Y + dY$, ferner die Schubkräfte S_x bzw. $S_x + dS_x$. Dabei ist

$$X = \sigma_x \cdot h \cdot \triangle y;\ Y = \sigma_y \cdot h \cdot \triangle x;\ dX = \frac{\delta X}{\delta x} dx;\ dY = \frac{\delta Y}{\delta y} \cdot dy;$$

ferner:

$$S_x = \tau_x \cdot h \cdot \triangle x;\ S_y = \tau_y \cdot h \cdot \triangle y;\ dS_x = \frac{\delta S_x}{\delta y} \cdot dx;\ dS_y = \frac{\delta S_y}{\delta x} dx.$$

Schließlich möge noch an diesem Element die Massenkraft $dQ_x = \mu_x \cdot h \cdot \triangle_x \cdot \triangle_y$, $dQ_y = \mu_y \cdot h \cdot \triangle x \cdot \triangle y$ wirken, wenn μ die Kraft pro Volumeneinheit in irgendeiner gegebenen Richtung bedeutet (μ_x und μ_y deren Komponenten). Dann ergibt sich zunächst aus der Bedingung für das Momentengleichgewicht $S_x \cdot \triangle y + S_y \cdot \triangle x = 0$ die bekannte Beziehung $\tau_x = \tau_y = \tau$. Für das Gleichgewicht der Kräfte in x- und y-Richtung gelten die Bedingungen:

(5a) $$(X + dX) - X + Y \cdot d\varphi_y - (S_x + dS_x) + S_x + S_y \cdot d\varphi_x + dQ_x = 0.$$

(5b) $$(Y + dY) - Y + X \cdot d\varphi_x - (S_y + dS_y) + S_y + S_x \cdot d\varphi_y + dQ_y = 0.$$

Beachtet man, daß nach den früheren Betrachtungen die geometrischen Beziehungen bestehen:

$$d\varphi_x = \frac{dx}{R_x};\quad d\varphi_y = \frac{dy}{R_y};\ \text{ferner}\ \frac{\delta \triangle x}{\delta y} = -\frac{dx}{R_x}\ \text{und}\ \frac{\delta \triangle y}{\delta x} = -\frac{dy}{R_y},$$

so ergeben sich nach Einführung dieser Beziehungen, wenn noch zur Abkürzung

$$\sigma_x \cdot h = s_x;\ \sigma_y \cdot h = s_y;\ \tau \cdot h = t$$

gesetzt wird, die beiden Gleichungen

(6a) $$\frac{\delta s_x}{\delta x} + \frac{s_y - s_x}{R_x} - \frac{\delta t}{\delta y} + \frac{2t}{R_x} + h \cdot \mu_x = 0$$

(6b) $$\frac{\delta s_y}{\delta y} + \frac{s_x - s_y}{R_x} - \frac{\delta t}{\delta x} + \frac{2t}{R_y} + h \cdot \mu_y = 0.$$

Wenn die Koordinaten Hauptspannungslinien sind und gleichzeitig die Massenkraft $\mu = 0$ ist, so vereinfachen sich die Gleichungen auf die bereits bekannte Form

(7a) $$\frac{\delta s_x}{\delta x} + \frac{s_y - s_x}{R_y} = 0.$$

(7b) $$\frac{\delta s_y}{dy} + \frac{s_x - s_y}{R_x} = 0.$$

Außer diesen aus dem Kräftegleichgewicht folgenden Beziehungen gelten noch die Gleichungen für die Dehnungen (wenn

$d\xi$ = Längenänderung eines Stückes dx einer x-Linie,
$d\eta$ = Längenänderung eines Stückes dy einer y-Linie,
E = Elastizitätsmodul,
m = Querkontraktionszahl).

(8a) $$d\xi = \frac{dx}{E}\left[\sigma_x - \frac{\sigma_y}{m}\right]$$

(8b) $$d\eta = \frac{dy}{E}\left[\sigma_y - \frac{\sigma_x}{m}\right].$$

3. Einführung einer Deformations-Hypothese: Durch die Gleichungen 6 (bzw. 7) und 8 ist unter Berücksichtigung der jeweiligen Grenzbedingungen eine Aufgabe eindeutig bestimmt. Infolge der sehr großen mathematischen Schwierigkeiten und der äußerst umfangreichen Rechenarbeit läßt sich aber auf dieser Grundlage ein bequemes praktisches Verfahren zur Lösung solcher Aufgaben kaum ableiten. Wir nehmen daher eine Annahme über die Art der Deformationen eines Stabes zu Hilfe, von der wir mit gutem Grund vermuten können, daß sie der Wirklichkeit sehr nahe kommen wird. Zu diesem Zwecke denken wir uns die x-Linien in Längsrichtung des Stabes (Längslinien) so gezogen, daß er in Bänder unterteilt wird, in deren Richtung normalerweise die größten Spannungen und daher die stärksten Dehnungen auftreten werden. Unter der Voraussetzung, daß es sich um einfache Belastungsfälle handle und daß die Angriffsstellen der äußeren Kräfte genügend weit entfernt seien, stellen wir nun folgende Behauptung auf: Die Deformationen erfolgen so, daß die Querlinien (y-Linien) bei richtig gewählten Längslinien ihre Form genau behalten, oder daß zum mindesten die Abweichungen von der ursprünglichen Form vernachlässigbar gering sind. Denkt man sich also zu den x-Linien zwei benachbarte Querlinien AB und $A'B'$ gezogen (Abbildung 3), so ändert die Linie $A'B'$ relativ zu AB bei der Belastung ihre Lage im allgemeinen so, als ob sie eine Parallelverschiebung bei gleichzeitiger Drehung ausgeführt hätte. Wäre dies nämlich nicht der Fall, d. h. würden bei der Belastung merkliche Verformungen der Querlinien erfolgen, so müßten so starke innere und i. a. daher notwendigerweise auch äußere Verzerrungen der Stabform eintreten, wie sie erfahrungsgemäß nicht beobachtet werden. Es sind vor allem die Schubspannungen, die solche Verzerrungen verhindern. Im Grunde genommen stellt das nachfolgend entwickelte, auf die Formbeständigkeit der Querlinien gegründete Näherungsverfahren nichts anderes dar als eine Fortbildung der alten, auf das Ebenbleiben der Querschnitte gegründeten Biegungstheorie des Balkens, die ja im allgemeinen auch nicht streng richtig ist, aber die maßgebenden Beanspruchungen richtig zu berechnen gestattet [3]).

Aus der vorstehenden Annahme über die Deformationen läßt sich ein Gesetz für die Dehnungen $d\xi$ eines von zwei benachbarten Querlinien begrenzten Streifens ableiten. Gegenüber dem üblichen Ansatz tritt jetzt nur insofern eine Änderung ein, als wir an Stelle von 6a (bzw. 7a) dieses Dehnungsgesetz einführen wollen. Der Verlauf der x-Linien ist dann durch das benutzte Gleichungssystem eindeutig bestimmt, allerdings von vornherein nicht genau bekannt. Er muß daher zunächst schätzungsweise angenommen und hinterher stets auf seine Richtigkeit geprüft werden.

Die Richtigkeit der obigen Annahme über die Deformationen wird am besten an Hand bekannter Lösungen nachgeprüft. Vergleicht man z. B. daraufhin den

Fall der durch eine Außenkraft belasteten unbegrenzten Halbscheibe oder des in der Spitze belasteten Keilkörpers (siehe z. B. Föppl: „Drang und Zwang", § 47), so sieht man, daß die obige Annahme über die Deformationen hier sogar streng erfüllt ist, daß sie überdies nicht nur unter der oben getroffenen Beschränkung auf weite Entfernung vom Lastangriffspunkt, sondern selbst noch in dessen Nähe (natürlich aber nicht mehr in seiner allernächsten Umgebung) gilt, daß ferner der Begriff „Stab" recht weit gefaßt werden darf. Die weitere obige Beschränkung auf einfache Belastungsfälle bedeutet insofern keine Einschränkung des lösbaren Aufgabenkreises, als zusammengesetzte Belastungen stets als Überlagerungen einfacher Belastungsfälle aufgefaßt werden können.

Der Grund, weshalb von den beiden Gleichungen 6 (bzw. 7) gerade die erste durch die Arbeitshypothese über die Deformationen ersetzt werden soll, ist der, daß die Krümmungsradien R_x wesentlich genauer bestimmt werden können, als die Radien R_y, weil die zwischen gegebenen Randlinien I und II (s. Abbildung 3) verlaufenden langen x-Linien sich mit viel größerer Sicherheit aufzeichnen lassen als die i. a. kurzen Querlinien.

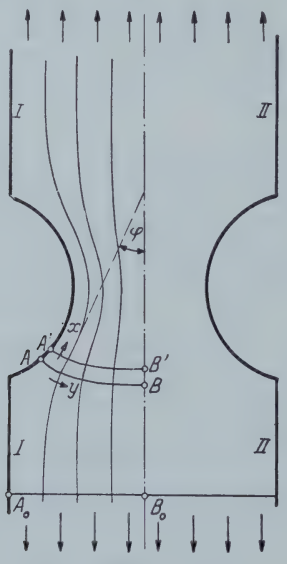


Abb. 3

Gleichung (8a) kann in der Form geschrieben werden

$$\sigma_x = E \cdot \frac{d\xi}{dx} + \frac{\sigma_y}{m}. \tag{9a}$$

Längs der Randlinien ist die Querspannung $\sigma_y = 0$, daher vereinfacht sich obige Beziehung z. B. für die Randlinie I zu

$$\sigma_{xI} = E \frac{d\xi_I}{dx_I}. \tag{9b}$$

Da $\frac{d\xi}{dx} = \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot \frac{d\xi_I}{dx_I} \cdot \frac{dx_I}{dx}$ geschrieben werden, so läßt sich 9a mit Rücksicht auf 9b und 3a auf die Form bringen

$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot V \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} + \frac{\sigma_y}{m} \cdot \tag{10}$$

Führt man diese Beziehung in 6b ein, so ergibt sich

$$\frac{\delta s_y}{\delta y} - \frac{s_y}{R_x}\left(1 - \frac{1}{m}\right) = \frac{\delta t}{dx} - \frac{2t}{R_y} - h \cdot \mu_y - \sigma_{xI} \cdot \frac{V \cdot h}{R_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot \tag{11}$$

Unter der Voraussetzung, daß alle Größen bis auf σ_y bekannt sind, läßt sich diese Gleichung längs einer Querlinie integrieren; mit $\sigma_{yI} = 0$ am Rande erhält man dann

$$\sigma_y = -\frac{V^{\frac{m-1}{m}}}{h}\left[\sigma_{xI} \cdot \int_I^y \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}}}{R_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot dy + \int_I^y \left(\frac{2t}{R_y} - \frac{\delta t}{\delta x} + h \cdot \mu_y\right) \cdot \frac{dy}{V^{\frac{m-1}{m}}}\right] \tag{12a}$$

Für Hauptspannungslinien ergibt sich wegen $\tau = 0$ die einfachere Beziehung, wenn noch $\mu = 0$ ist

$$\sigma_y = -\sigma_{xI} \cdot \frac{V^{\frac{m-1}{m}}}{h} \int_I^y \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}}}{R_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot dy \; ; \tag{12b}$$

in diesem Fall kann 10 in der Form geschrieben werden

$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot V \cdot \left[\frac{d\xi}{d\xi_I} - \frac{1}{m \cdot h \cdot V^{\frac{1}{m}}} \cdot \int_I^y \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}}}{R_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot dy\right]. \tag{13}$$

II. Der dünne Stab

a) Der biegungsfrei belastete symmetrische Stab.

1. Die Spannungsermittlung: In Abbildung 3 ist der Fall eines durch eine Zugkraft P biegungsfrei belasteten symmetrischen Stabes dargestellt. Es soll die Spannungsverteilung an der Einkerbung untersucht werden. Die x- und damit auch die y-Linien zeigen hier einen den Hauptspannungslinien völlig entsprechenden Verlauf, so daß wir von der Mitführung der Schubspannungsglieder absehen und für die weitere Rechnung die einfachen Gleichungen 12 und 13 zugrunde legen können.

Zunächst gilt es, das Gesetz für die Dehnungen $d\xi$ aufzustellen unter der obigen Voraussetzung, daß die Querlinien bei Belastung des Stabes formbeständig sind. In Abbildung 4 sind die beiden benachbarten Querlinien AB und $A'B'$ für den unbelasteten Stab herausgezeichnet. Bei der Belastung des Stabes kann für die

Bewegung der Linie $A'B'$ aus Symmetrygründen keine Drehung, sondern lediglich eine Parallelverschiebung um den Betrag $d\xi_0 = A'A'' = M'M''$ in Achsenrichtung in die neue Lage $A''B''$ in Frage kommen. Das Stück $MM' = dx$ einer Längslinie wird daher auf die Strecke MM'' gedehnt, wobei für die Dehnung $M_1M'' = d\xi$ die

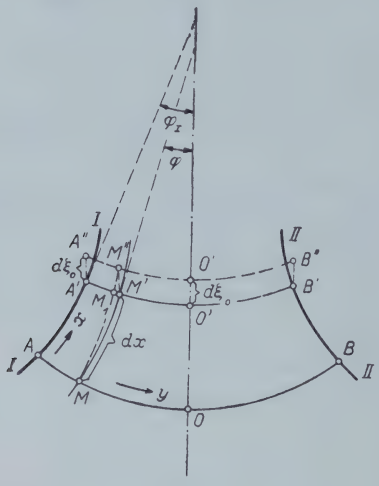


Abb. 4

Beziehung gilt, wenn φ den Winkel zwischen der Tangente an die x-Linie und der Symmetrielinie bezeichnet:

$$d\xi = d\xi_0 \cdot \cos\varphi.$$

Entsprechend erhält man für die Dehnung des Stückchens $AA' = dx_I$ auf der Randlinie I die Beziehung

$$d\xi_I = d\xi_0 \cdot \cos\varphi_I.$$

Es kann daher das Verhältnis gebildet werden

$$\frac{d\xi}{d\xi_I} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_I}. \tag{14}$$

Dieses in 12 und 13 eingesetzt, gibt die endgültigen Gleichungen

$$\sigma_y = -\frac{\sigma_{xI}}{\cos\varphi_I} \cdot \frac{V^{\frac{m-1}{m}}}{h} \cdot \int_1^y \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}}}{R_x} \cdot \cos\varphi \cdot dy; \tag{15}$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\varphi_I} \cdot V \cdot \left[\cos\varphi - \frac{1}{m \cdot h \cdot V^{\frac{1}{m}}} \cdot \int_1^y \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}}}{R_x} \cdot \cos\varphi \cdot dy\right]. \tag{16}$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichung ist nach Aufzeichnung des Liniennetzes alles bekannt bis auf die Integrationskonstante σ_{xI}; sie wird aus der Bedingung gefunden, daß die Summe aller inneren Kräfte der äußeren Kraft P das Gleichgewicht halten muß. Diese Bedingung lautet:

$$P = \int_I^{II} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot \cos\varphi,$$

oder mit Einführung von 16

(17)
$$P = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\varphi_I} \cdot \int_I^{II} V \cdot h \cdot \cos\varphi \left[\cos\varphi - \frac{1}{m \cdot h \cdot V^{\frac{1}{m}}} \cdot \int_I^{y} \frac{h \cdot V^{\frac{1}{m}} \cos\varphi}{R_x} \cdot dy \right] dy$$

In den meisten Fällen genügt es, hier von der Berücksichtigung der Querkontraktion abzusehen (also m $= \infty$ zu setzen), da die Querspannungen im allgemeinen verhältnismäßig klein sind und daher ihr Einfluß auf die Längsspannungen σ_x unbedeutend ist; außerdem treten die höchsten Werte von σ_x gewöhnlich am Rand auf, also gerade dort, wo σ_y verschwindet. In diesem Falle vereinfachen sich die Gleichungen 16 und 17 zu

(16a)
$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot V \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_I}$$

(17a)
$$P = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\varphi_I} \int_I^{II} V \cdot h \cdot \cos^2\varphi \cdot dy.$$

Die Querspannungen sind hingegen stets nach 15 zu berechnen, da für sie die Querkontraktion von wesentlichem Einfluß ist. Der Rechnungsgang zur Ermittlung der Längsspannungen σ_x längs einer Querlinie AB ist auf Grund der Gleichungen 16a und 17a demnach folgender:

1. Aufzeichnungen des wahrscheinlichen Verlaufs der x- und y-Linien;
2. Messung der Krümmungsradien R_x in bekannter Weise mit einem Krümmungsmesser und Auftragen der Kurve $K_1 = 1 : R_x$ längs der gestreckt herausgezeichneten Querlinie AB (Abbildung 5);
3. Kurve $K_2 = V = e^{\int_I^y K_1 \, dy}$; statt dessen kann auch näherungsweise nach 3b unmittelbar $V = \frac{\triangle x'_I}{\triangle x'}$ gesetzt und das Aufzeichnen der Kurve K_1 nebst ihrer Integration erspart werden; dazu sind an der zu untersuchenden Stelle zwei Querlinien mit möglichst kleinem, aber überall noch deutlich meßbarem Abstand $\triangle x'$ zu ziehen;
4. Kurve $K_3 = V \cdot h \cdot \cos^2\varphi$;

5. Integral $K_4 = \int_{I}^{II} K_3 \, . \, dy$.

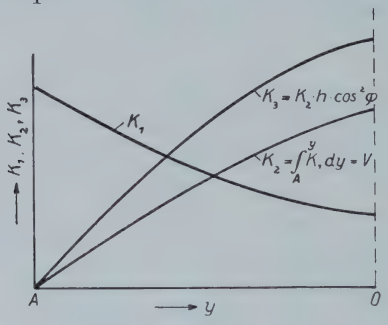


Abb. 5

Dann ist die Integrationskonstante

$$\sigma_{xI} = \frac{P. \cos \varphi_I}{K_4}$$

und die Längsspannung

$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot K_2 \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_I}$$

Der Rechnungsgang ist genau der gleiche wie bei der Bestimmung des Geschwindigkeitsverlaufs bei der ebenen Strömung. Auch die Gleichungen sind beinahe identisch bis auf den Faktor $\cos \varphi$: Die „Spannungsgleichung" 16a entspricht der „Geschwindigkeitsgleichung", die „Kraftgleichung" 17a der „Durchflußgleichung" beim Strömungsproblem. Der Rechnungsgang bei Berücksichtigung des Einflusses der Querkontraktion nach 16 und 17 ist ähnlich, aber entsprechend umständlicher

2. Prüfung des Ergebnisses: Wie bereits unter I betont, ist stets das angenommene Liniennetz auf seine Richtigkeit hin zu prüfen. Dies geschieht wie folgt: Nach 10 ist, wenn $V = \frac{dx_I}{dx}$ gesetzt wird, mit Beachtung von 14

$$dx = \frac{\sigma_{xI} \, . \, \cos \varphi}{\left(\sigma_x - \frac{\sigma_y}{m}\right) \cos \varphi_I} \, . \, dx_I \, .$$

Längs der Randlinie kann dann integriert werden und man erhält

$$x = \int_{Ao}^{A} \frac{\sigma_{xI} \, . \, \cos \varphi}{\left(\sigma_x - \frac{\sigma_y}{m}\right) \cos \varphi_I} \cdot dx_I \cdot \tag{18}$$

Wenn der Einfluß der Querkontraktion auf die Spannungen σ_x vernachlässigt wurde, ist dementsprechend auch hier das Glied mit σ_y wegzulassen. Die Gleichung

ist in folgender Weise zu verwerten: Nachdem längs einer genügenden Anzahl von Querlinien die Spannungen bestimmt wurden, ist von einer beliebig gewählten Ausgangsquerlinie A_0B_0 (Abbildung 3) an längs der Randlinie I bis zu irgendeiner anderen Querlinie der Ausdruck unter obigem Integralzeichen zu integrieren. Dabei beziehen sich σ_x, σ_y und φ auf eine bestimmte x-Linie M_0M und σ_{xI}, σ_{yI} und φ_I jeweils auf dieselbe Querlinie wie σ_x, σ_y und φ. Die errechnete Strecke x soll dann möglichst genau gleich der Strecke M_0M werden. Ist dies in erheblichem Maße nicht der Fall, so war der angenommene Verlauf der x-Linien sehr unrichtig geschätzt und muß entsprechend abgeändert werden. Diese Prüfung ist für mehrere Längslinien vorzunehmen. Da sie aber wegen ihrer großen Umständlichkeit sich für häufigeren Gebrauch nicht gut eignet, soll im folgenden noch eine kürzere Methode angegeben werden.

Wenn unsere Annahme über die Art der Deformationen den inneren Kraftwirkungen genügend genau entspricht (was ja vorausgesetzt ist), muß jedenfalls auch die bisher nicht verwendete Gleichgewichtsbedingung 5a befriedigt sein. Da wir im vorliegenden Fall weder Schubspannungen τ noch Massenkräfte μ zu berücksichtigen haben, vereinfacht sich 5a in Anwendung auf die Randzone, längs welcher außerdem noch $\sigma_y = 0$ ist, zu

$$dX = 0.$$

Die Integration längs der Randlinie I führt zu der einfachen Beziehung

$$X = \sigma_x \cdot h \cdot \triangle y = \sigma_{x0} \cdot h_0 \cdot \triangle y_0 = \text{konst},$$

die genügend genau auch für ein Kraftband von der endlichen, nicht zu großen Breite $\triangle y'$ bzw. $\triangle y'_0$ gilt. Dies bedeutet: Bei biegungsfreier Belastung des Stabes ist in dem am Rand entlang laufenden Kraftband die wirksame Kraft X an allen Stellen gleich, so daß die Bandbreite $\triangle y'$ an irgendeiner Stelle die Gleichung befriedigen muß

$$\triangle y' = \triangle y'_0 \cdot \frac{\sigma_{x0} \cdot h_0}{\sigma_x \cdot h}, \tag{19}$$

wobei die Werte σ_{x0}, h_0, $\triangle y'_0$ sich auf einen Ausgangsquerschnitt beziehen, in welchem die Spannungsverteilung von vornherein bekannt ist (z. B. $\sigma_{x0} = \text{konst}$ über den ganzen Ausgangsquerschnitt). Für den zu untersuchenden Querschnitt ist, nachdem die Spannungen bestimmt wurden, zu prüfen, ob die Gleichung für das äußerste Kraftband erfüllt ist. Hierbei ist für die Spannungen der jeweilige Mittelwert über die Bandbreite an dieser Stelle einzusetzen. Ist die Gleichung nicht befriedigt, so ist der angenommene Verlauf der Spannungslinien entsprechend abzuändern und die Rechnung zu wiederholen. Wenn auch nach Vorstehendem die Prüfung der Richtigkeit der angenommenen x-Linien sich nur auf das äußerste Kraftband erstreckt, so ist diese dennoch im allgemeinen hinreichend, da alsdann auch der Verlauf der inneren x-Linien (der übrigens in den praktisch vorkommenden Fällen stets von geringerer Bedeutung ist) mit wesentlich größerer Sicherheit geschätzt werden kann. Für die letztere Kontrollmethode genügt es, die Spannungsverteilung längs einer einzigen Querlinie zu ermitteln.

b) Der auf Biegung beanspruchte Stab.

1. Allgemeine Beziehungen: In Abbildung 6 ist ein Stab dargestellt, der durch eine Kraft P auf Biegung beansprucht wird. Auch hier sollen die x-Linien als Längslinien verlaufen. Die Spannungstrajektorien sind durch die ge-

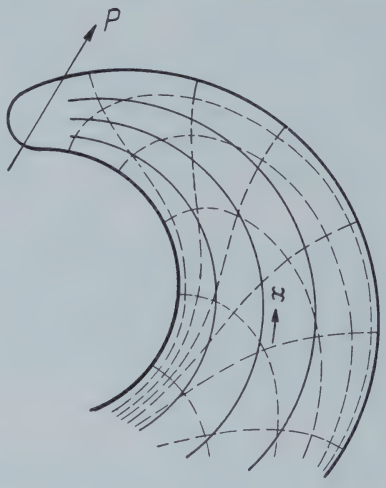


Abb. 6

strichelten Linien angedeutet; es besteht also hier im Gegensatz zum biegungsfrei belasteten Stab nach a) ein erheblicher Unterschied zwischen den Spannungslinien und dem der Rechnung zugrunde gelegten Liniennetz. Nur in unmittelbarer Nähe der Ränder gehen die beiden Netze ineinander über.

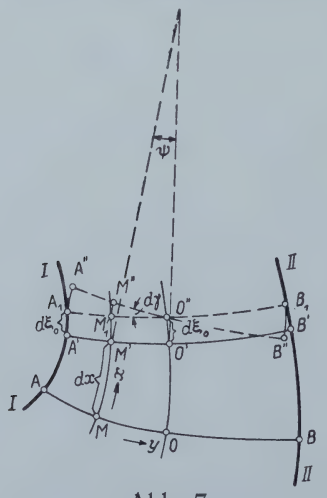


Abb. 7

In Abbildung 7 stellen die Linien AB und $A'B'$ zwei benachbarte Querlinien bei unbelastetem Stab dar. Infolge der Belastung führt die Linie $A'B'$ gemäß unserer Annahme relativ zu AB unter Erhaltung ihrer Form eine Bewegung in die neue Lage $A''B''$ aus. Sie kann zerlegt werden in eine Parallelverschiebung $0'0'' = A'A_1 = M'M_1 = d\xi_0$ in die Lage A_1B_1 und in eine Drehung um $0''$ um den Winkel $d\gamma$ in die endgültige Lage. Ein Punkt M' gelangt daher zunächst bei der Parallelverschiebung nach M_1, sodann durch die Drehung von M_1 nach M'' (wobei $M_1M'' = r \cdot d\gamma$, wenn $0''M_1 = 0'M' = 0M = r$ gesetzt). Beim ersten Schritt erfährt die Strecke $MM' = dx$ eine Dehnung um $d\xi' = d\xi_0 \cdot \cos\psi$, wenn ψ den Winkel zwischen den Tangenten an die x-Linien in $0'$ und M' (oder auch in 0 und M) bezeichnet; beim zweiten Schritt tritt eine weitere Dehnung ein um $d\xi'' = r \cdot d\gamma \cdot \cos\vartheta$, wo ϑ der Winkel zwischen Fahrstrahl r und der Tangente an die Querlinie in M' oder M ist. Die gesamte Dehnung ist infolgedessen

$$d\xi = d\xi' + d\xi'' = d\xi_0 \cdot \cos\psi + c \cdot d\gamma, \tag{20}$$

wo $c = r \cdot \cos\vartheta$ = Abstand der Tangente an die x-Linie vom Punkt 0.

An der Randlinie I erhält man dementsprechend

$$d\xi_I = d\xi_0 \cdot \cos\psi_I + c_I \cdot d\gamma, \tag{21}$$

so daß das Verhältnis besteht, wenn zur Abkürzung $v = \dfrac{d\gamma}{d\xi_o}$ gesetzt wird,

$$\frac{d\xi}{d\xi_I} = \frac{\cos\psi + v \cdot c}{\cos\psi_I + v \cdot c_I}. \tag{22}$$

Von besonderer Bedeutung ist der Sonderfall, daß die Dehnung $d\xi_0 = 0$ wird, d. h. daß die Querlinie $A'B'$ relativ zu AB lediglich eine Drehung um $0'$ ausführt. Dann ist in diesem Schnitt nur ein Moment, aber keine Kraft zu übertragen. Wir wollen daher in Analogie zum gebogenen Balken den Punkt $0'$ bzw. 0 als den „neutralen Punkt" der Schnittlinie bezeichnen. Die letzten Gleichungen vereinfachen sich in diesem Fall zu

$$d\xi = c \cdot d\gamma \tag{20a}$$

$$\frac{d\xi}{d\xi_I} = \frac{c}{c_I}. \tag{22a}$$

Bei den Längsspannungen σ_x (nicht aber bei den Querspannungen σ_y) kann hier von vornherein der Einfluß der Querkontraktion vernachlässigt werden, so daß im allgemeinen Fall nach 10 und 22 die Beziehung besteht

$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot V \cdot \frac{\cos\psi + v \cdot c}{\cos\psi_I + v \cdot c_I}, \tag{23}$$

die sich im Sonderfall der reinen Biegung vereinfacht zu

$$\sigma_x = \sigma_{xI} \cdot V \cdot \frac{c}{c_I}. \tag{23a}$$

Der Einfluß der Querkontraktion ist hier deshalb vernachlässigbar, weil am Rande, wo die Längsspannungen am größten sind, die Querspannungen verschwinden, während in den mittleren Teilen, wo die Querspannungen erheblicher werden

können, wiederum die Längsspannungen verschwinden. Überdies wirken die größeren und von der Querkontraktion fast unbeeinflußten Spannungen σ_x in der Randzone an den größten Hebelarmen c in bezug auf den neutralen Punkt, während die kleineren Spannungen in der neutralen Zone nur an kleinem Hebelarm c angreifen und daher nur einen unbedeutenden Beitrag zum inneren Moment liefern, das dem äußeren Moment das Gleichgewicht halten muß. Aus diesen Gründen kann bei den Längsspannungen die Querkontraktion mit noch größerem Recht vernachlässigt werden als beim biegungsfrei belasteten Stab nach Fall a.

2. Die reine Biegung: Im Falle reiner Biegung ist die Lage des neutralen Punktes dadurch bestimmt, daß von den im Schnitte AB wirkenden Spannungen keine resultierende Kraft, weder in Längsrichtung noch in Querrichtung verursacht wird. Nun besteht in unserem Fall gegenüber dem einfachen Balken der grundsätzliche Unterschied, daß hier, auch wenn lediglich ein äußeres Moment wirkt, im Schnitt AB nicht nur Längsspannungen σ_x, sondern im allgemeinen auch Schubspannungen τ auftreten. Bezüglich dieser letzteren weiß man, daß sie am Rande 0 sind und ungefähr in der neutralen Zone ihren Höchstwert erreichen. Da der Einfluß dieser Schubspannungen auf die praktisch weit bedeutungsvolleren Längsspannungen nur gering ist, wie sich zeigen wird, so kann zu ihrer ungefähren Berücksichtigung einfach nach Abbildung 8 eine Verteilungsfunktion τ' angenommen werden, wobei die wirkliche Schubspannung angenähert

(24) $$\tau = \alpha \cdot \tau'$$

ist, wo α eine zunächst unbekannte Proportionalitätskonstante bezeichnet. Die Bedingung, daß die Spannungen weder eine Kraft P_x in Richtung der Tangente an die

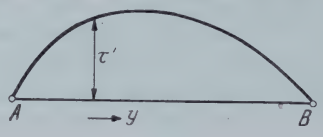


Abb. 8

x-Linie im neutralen Punkt 0 noch eine dazu senkrechte Querspannung P_y ergeben dürfen, führt zu den Beziehungen

(25) $$P_x = 0 = \int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot \cos\psi - \int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \sin\psi$$

(26) $$P_y = 0 = \int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot \sin\psi + \int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \cos\psi.$$

Bei Einführung von 23a und 24 können die Gleichungen geschrieben werden:

(25a) $$\frac{\sigma_{xI}}{\alpha \cdot c_I} = \frac{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \tau' \cdot h \cdot \sin\psi \cdot dy}{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot c \cdot \cos\psi \cdot dy}$$

$$\frac{\sigma_{xI}}{a \cdot c_I} = -\frac{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \tau' \cdot h \cdot \cos\psi \cdot dy}{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot c \cdot \sin\psi \cdot dy} \tag{26a}$$

Zur Auffindung des neutralen Punktes ist in der Weise zu verfahren, daß man irgend einen wahrscheinlichen Punkt auf der Linie AB als neutralen Punkt ansieht und nach vorstehenden Gleichungen die beiden Integralquotienten ermittelt. Es ist dann jene Stelle der gesuchte Punkt, bei dem die beiden Quotienten einander gleich sind.

Zu einem wesentlich einfacheren Verfahren gelangt man, wenn in Gleichung 25 das zweite Glied rechts vernachlässigt wird, wie zulässig, da der Einfluß der Schubspannungen τ auf die Längsspannungen σ_x sehr klein ist (einmal wegen ihrer verhältnismäßigen Kleinheit, sodann auch wegen ihrer Querstellung). Die Lage des neutralen Punktes ergibt sich dann bereits aus der Beziehung

$$\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot c \cdot \cos\psi \cdot dy = 0. \tag{27}$$

Da im allgemeinen noch genügend genau $c \cong y_0 - y$ gesetzt werden kann, wenn y_0 der Abstand des neutralen Punktes von der Randlinie I ist (auf der Querlinie gemessen), so erhält man die einfachere Beziehung für die Lage des neutralen Punktes

$$y_0 = \frac{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot y \cdot \cos\psi \cdot dy}{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot \cos\psi \cdot dy}; \tag{27a}$$

dabei kann in der Regel wegen der Kleinheit von ψ i. a. $\cos\psi = \sim 1$ gesetzt werden.

Aus 26a folgt für die Proportionalitätskonstante a

$$a = -\frac{\sigma_{xI}}{c_I} \cdot \frac{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} V \cdot h \cdot c \cdot \sin\psi \cdot dy}{\int_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}} \tau' \cdot h \cdot \cos\psi \cdot dy} = -\frac{\sigma_{xI}}{c_I} \cdot Q \tag{26b}$$

(Q nur zur Abkürzung für den Integralquotienten). Zur Ermittlung der Spannungen fehlt nunmehr lediglich die Kenntnis von σ_{xI}. Dieser Wert wird aus der Bedingung gefunden, daß das Moment der inneren Kräfte in bezug auf den neutralen Punkt gleich dem äußeren Moment M sein muß:

$$M = \int_{I}^{II} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot c - \int_{I}^{II} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \triangle c,$$

wo $\triangle c$ der jeweilige Abstand der Tangente an die Querlinie vom neutralen Punkt ist. Mit Beachtung der Gleichungen 23a, 24 und 26b erhält man

$$M = \frac{\sigma_{xI}}{c_I} \cdot \left[\int_{I}^{II} V \cdot h \cdot c^2 \cdot dy + Q \int_{I}^{II} \tau' \cdot h \cdot \Delta c \cdot dy \right]. \tag{28}$$

Aus dieser Beziehung kann nunmehr σ_{xI}, ferner σ_x nach 23a sowie α nach 26b und τ nach 24 bestimmt werden. Das Glied mit Q auf der rechten Seite obiger Gleichungen ist im allgemeinen von so verschwindendem Einfluß, daß es in den meisten praktischen Fällen vernachlässigt werden kann, wodurch die Spannungsermittlung erheblich vereinfacht wird.

3. Beliebig belasteter Stab: Im allgemeinen ist in einem Schnitt AB außer dem Biegungsmoment noch eine beliebig gerichtete Kraft zu übertragen. Da die von der Übertragung dieser Kräfte herrührenden Längsspannungen meist sehr klein sind im Vergleich zu den Biegungsspannungen, so kann gewöhnlich unter Vernachlässigung der Kraftübertragung lediglich mit dem Moment gerechnet werden, ähnlich wie bei der reinen Biegung nach 2. Glaubt man jedoch den Einfluß der Kräfte nicht vernachlässigen zu dürfen, so gestaltet sich die Spannungsermittlung entsprechend umständlicher. Es sind drei Bedingungen zu erfüllen, nämlich, daß in einem Schnitt AB ein Moment, eine Normalkraft P_x und eine Querkraft P_y zu übertragen ist. Da der Einfluß der Schubspannungen auch hier von untergeordneter Bedeutung ist, genügt es, wiederum von vornherein eine Verteilungsfunktion τ' nach Abbildung 8 schätzungsweise anzunehmen, so daß für die wirklichen Schubspannungen ebenfalls die Beziehung 24 gilt. Die drei Bedingungsgleichungen lauten dann:

$$M = \int_{I}^{II} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot c - \int_{I}^{II} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \triangle c$$

$$P_x = \int_{I}^{II} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot \cos\psi - \int_{I}^{II} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \sin\psi$$

$$P_y = \int_{I}^{II} \sigma_x \cdot h \cdot dy \cdot \sin\psi + \int_{I}^{II} \tau \cdot h \cdot dy \cdot \cos\psi.$$

Als neutralen Punkt 0 einer Querlinie (in dem jetzt nicht mehr $\sigma_x = 0$ ist) soll dabei die gleiche Stelle wie bei reiner Biegung bezeichnet werden. Mit Einführung der Beziehungen 23 und 24 lauten die Gleichungen

$$M = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\psi_I + v \cdot c_I} \int_{I}^{II} V \cdot h \cdot c \,(\cos\psi + v \cdot c)\, dy - \alpha \int_{I}^{II} \tau' \cdot h \cdot \Delta c \cdot dy \tag{29}$$

$$(30)\quad P_x = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\psi_I + v\cdot c_I}\int_I^{II} V\cdot h\cdot\cos\psi\cdot(\cos\psi + v\cdot c)\cdot dy - \alpha\int_I^{II}\tau'\cdot h\cdot\sin\psi\cdot dy$$

$$(31)\quad P_y = \frac{\sigma_{xI}}{\cos\psi_I + v\cdot c_I}\int_I^{II} V\cdot h\cdot\sin\psi\,(\cos\psi + v\cdot c)\,dy + \alpha\int_I^{II}\tau'\cdot h\cdot\cos\psi\cdot dy.$$

Aus diesen Gleichungen sind die drei Unbekannten σ_{xI}, v und α zu bestimmen, was am zweckmäßigsten in schrittweiser Annäherung erfolgt, indem zunächst in den beiden ersten dieser Gleichungen das im allgemeinen unbedeutende Schubspannungsglied [4]) vernachlässigt wird ($\alpha = 0$ gesetzt). Man erhält dann

$$(32)\quad v = -\frac{\int_I^{II} V\cdot h\cdot\cos\psi\cdot\left(\frac{M}{P_x}\cos\psi - c\right)dy}{\int_I^{II} V\cdot h\cdot c\,\left(\frac{M}{P_x}\cdot\cos\psi - c\right)dy}$$

Aus 29 oder 30 kann dann (mit $\alpha = 0$) σ_{xI} bestimmt werden. Mit diesen Werten σ_{xI} und v ist nunmehr aus 31 die Konstante α zu berechnen.

Damit wird es möglich, zu prüfen, ob in den Gleichungen 29 und 30 das Schubspannungsglied von deutlichem Einfluß ist. Trifft dies zu, so ist aus diesen Gleichungen unter Berücksichtigung der Schubspannungsglieder mit dem errechneten Wert von α eine Neubestimmung von σ_{xI} und v vorzunehmen. Mit diesen neuen Werten von σ_{xI} und v kann sodann aus 31 ein berichtigtes α ermittelt werden usw. Die Rechnung ist genügend genau, wenn die Berichtigungen unbedeutend sind.

4. Die Querspannungen: Die Querspannungen σ_y ergeben sich nach Ermittlung der Längsspannungen aus 11, wenn für $\frac{d\xi}{d\xi_I}$ die Werte nach 22 bzw. 22a eingesetzt werden; die Größen σ_{xI}, v und α sind dann bereits bekannt. Wenn man das Glied $\frac{\partial t}{\partial x}$ vernachlässigt, kann die Spannungsermittlung längs einer Querlinie ohne weiteres erfolgen; andernfalls müßten zur Bestimmung jenes Gliedes die Längs- und Schubspannungen für mehrere Querlinien ermittelt werden.

5. Festlegung der Vorzeichen: In vorstehenden Entwicklungen wurden hinsichtlich der Vorzeichen, wie zusammenfassend nochmals festgestellt sei, folgende Festsetzungen getroffen: Wenn man von einem Punkt der Randlinie I aus in positiver x-Richtung sieht, soll die positive y-Richtung nach rechts zeigen; der Krümmungsradius R_x, R_y einer x- oder y-Linie ist positiv, wenn der Krümmungsmittelpunkt nach der positiven y-Richtung bzw. x-Richtung zu liegt; die Strecken c werden vom neutralen Punkt 0 aus gemessen und gelten als positiv, wenn sie von 0 aus in negativer y-Richtung hin liegen; $\triangle c$ ist positiv, wenn es von 0 aus in negativer x-Richtung liegt; die Winkel ψ zwischen den in positiver x-Richtung

gezogenen Tangenten an die x-Linie werden von der positiv gerichteten Tangente in 0 aus im Uhrzeigersinn gemessen; die Spannungen σ_x und σ_y gelten als positiv, wenn sie Zugspannungen sind; denkt man sich längs AB das Stabende, an dem die äußere Kraft bzw. das Moment angreift, weggeschnitten und an dem verbleibenden Stabteil die Spannungen als äußere Kräfte angebracht, so gelten die Schubspannungen τ als positiv, wenn sie in positiver y-Richtung wirken; das äußere Moment in bezug auf den neutralen Punkt 0 ist positiv, wenn es im Uhrzeigersinn dreht; die äußere Kraftkomponente P_x ist positiv, wenn sie Zugkraft ist; P_y gilt als positiv, wenn es in positiver y-Richtung wirkt.

6. Prüfung der Längsspannungen: Die Prüfung auf die Richtigkeit der zunächst schätzungsweise angenommenen x-Linien kann ganz ähnlich wie im Falle a durchgeführt werden. Aus 23 und 3a findet man die Beziehung

$$dx = dx_I \cdot \frac{\sigma_{xI}}{\sigma_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I},$$

wobei für $\frac{d\xi}{d\xi_I}$ die Ausdrücke nach 22 bzw. 22a einzusetzen sind. Die Integration ergibt

$$\text{(33)} \qquad x = \int_{A_o}^{A} \frac{\sigma_{xI}}{\sigma_x} \cdot \frac{d\xi}{d\xi_I} \cdot dx_I$$

Die Verwertung von 33 erfolgt in gleicher Weise wie beim biegungsfreien Stab, nur daß jetzt an Stelle von $\frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_I}$ der neue Wert für $\frac{d\xi}{d\xi_I}$ einzusetzen ist.

Um eine einfachere Kontrollmethode zu finden, kann ähnlich wie beim biegungsfrei belasteten Stab auf die Gleichung 5a zurückgegriffen werden. Für die äußerste Randschicht vereinfacht sich diese Beziehung (wenn $\mu = 0$ ist) zu

$$dX - dS_x = 0.$$

Bei der reinen Biegung ist das Glied dS_x wegen der Kleinheit der Schubspannungen von sehr geringem Einfluß, so daß es vernachlässigt und somit die Prüfung auf Grund von Gleichung 19 vorgenommen werden kann. Liegt keine reine Biegung vor, so kann trotzdem ähnlich verfahren werden, indem man so rechnet, als ob dem ganzen Stab entlang jenes Biegungsmoment wirken würde, wie es in dem jeweils zu untersuchenden Querschnitt herrscht [5]).

7. Die Ausbiegung des Stabes: Schließlich läßt sich noch in verhältnismäßig einfacher Weise die Verbiegung eines Stabes bestimmen. Aus der Gleichung $\sigma_{xI} = E \cdot \frac{d\xi_I}{dx_I}$ und 21 folgt (mit $d\xi_o = \frac{d\gamma}{v}$) die Verdrehung

$$\text{(34)} \qquad d\gamma = \frac{\sigma_{xI}}{E\left(\frac{\cos\psi_I}{v} + c_I\right)} dx_I$$

einer Querlinie $A'B'$ gegenüber der benachbarten Linie AB.

Im Sonderfalle der reinen Biegung vereinfacht sich die Beziehung zu

$$d\gamma = \frac{\sigma_{xI}}{E \cdot c_I} \cdot dx_I \tag{34a}$$

Bezeichnet nun Q_0S (Abbildung 9) die der neutralen Linie sich am meisten anschmiegende x-Linie (die Verbindungslinie der neutralen Punkte ist im allgemeinen keine x-Linie) und $QS = r$ die Entfernung eines Punktes Q dieser Mittellinie vom

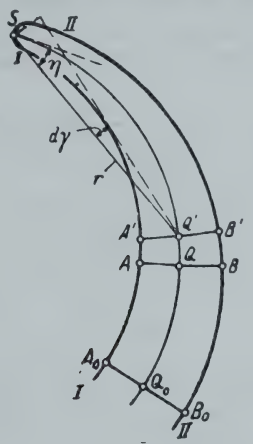


Abb. 9

Stabende, so verursacht die Drehung des Stabendes $SA'B'$ um den Winkel $d\gamma$ gegenüber der Querlinie AB die Verschiebung des Punktes S senkrecht zur Mittellinie um

$$df_y = r \cdot d\gamma \cdot \cos\eta$$

(wenn η den Schnittwinkel zwischen Fahrstrahl QS und der Mittellinie in S bedeutet), und in Richtung der Mittellinie

$$df_x = r \cdot d\gamma \cdot \sin\eta.$$

Daraus folgen für das Stück A_0B_0S die Verschiebungen des Punktes S relativ zu A_0B_0

$$f_y = \int_{A_0}^{S} r \cdot \cos\eta \cdot d\gamma \tag{35a}$$

$$f_x = \int_{A_0}^{S} r \cdot \sin\eta \cdot d\gamma, \tag{35b}$$

wobei für $d\gamma$ der Ausdruck nach 34 bzw. 34a einzusetzen ist. Die Integration hat also längs der Randlinie I zu erfolgen. Die unter dem Integralzeichen stehenden Werte beziehen sich natürlich jeweils auf eine bestimmte Querlinie.

B. Der durch Drehmomente belastete Stab

I. Der runde Stab

Ist ein gerader runder Stab von veränderlichem Durchmesser durch ein Drehmoment belastet, so können insbesondere an den Auskehlungen infolge Kerbwirkungen sehr starke Erhöhungen der Schubspannungen τ auftreten [6]). Denkt man sich einen Längsschnitt durch den Stab gelegt, so kann man sich ähnlich wie unter A ein Koordinatennetz gezogen denken, bei dem die Längslinien (Meridianlinien) wiederum als x-Linien, die Querlinien AB (Abbildung 10) als y-Linien bezeichnet

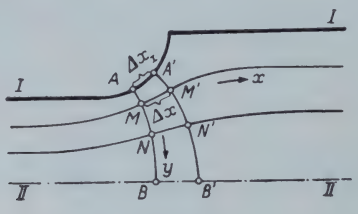


Abb. 10

werden sollen. Die x-Linien sollen jetzt die Schnittlinien einer radialen Ebene mit den Spannungsflächen sein, so daß also ähnlich wie beim biegungsfrei belasteten Stab in ihrer Richtung keine Schubspannungen wirken. Unter Vernachlässigung i. a. belangloser Nebenwirkungen machen wir dann hinsichtlich der Deformationen folgende Voraussetzungen:

1. Die Querlinien AB bleiben bei Belastung des Stabes genau formbeständig.
2. Die einer Querlinie AB entsprechende Schnittfläche durch den Stab soll als „starr" gelten, d. h. sie verdreht sich als Ganzes um einen gewissen Winkel.

Denkt man sich zwei benachbarte Querlinien AB und $A'B'$ gezogen, wobei ihr Abstand an irgendeiner Stelle $MM' = \triangle x = dx$ und die relative Verdrehung des Schnittes $A'B'$ gegenüber AB mit $\triangle\alpha$ bzw. $d\alpha$ bezeichnet wird, so gilt für die Schubspannung τ die Beziehung

$$\tau = G \cdot \frac{r \cdot \Delta\alpha}{\Delta x} = G \cdot \frac{r \cdot d\alpha}{dx} \tag{36}$$

Auf der Randlinie I ist $\tau_I = G \cdot \dfrac{r_I \cdot d\alpha}{dx_I}$ und daher

$$\tau = \tau_I \cdot \frac{\Delta x_I}{\Delta x} \cdot \frac{r}{r_I} = \tau_I \cdot \frac{r}{r_I} \cdot V. \tag{36a}$$

Die an einer der Strecke $MN = dy$ entsprechenden Ringfläche $dF = 2\pi r \cdot dy$ wirkenden Schubkräfte erzeugen in bezug auf die Stabachse II ein Drehmoment

$$dM = dF \cdot \tau \cdot r = \frac{2\pi \cdot \tau_I}{r_I} \cdot r^3 \cdot V \cdot dy. \tag{37}$$

Für das Gesamtmoment M gilt daher die Beziehung

$$M = \frac{2\pi \cdot \tau_I}{r_I} \int_{\text{I}}^{\text{II}} r^3 \cdot V \cdot dy. \tag{38}$$

Hieraus kann die Schubspannung τ_I und sodann nach 36a die Spannung τ für einen beliebig gelegenen Punkt auf einer Querlinie berechnet werden.

Der einem Stababschnitt AA' (gemessen auf der Randlinie I) entsprechende Verdrehungswinkel α ergibt sich nach 36 zu

$$\alpha = \frac{1}{G} \int_{\text{A}}^{\text{A}'} \frac{\tau_I}{r_I} \cdot dx_I. \tag{39}$$

Wie im Belastungsfall A muß auch hier der Verlauf der angenommenen x-Linien auf seine Richtigkeit hin geprüft werden. Hierzu dient folgende Überlegung: Da in den den x-Linien entsprechenden Spannungsflächen keine Schubspannungen übertragen werden sollen, muß notwendigerweise das Drehmoment dM längs dieser Fläche überall den gleichen Wert haben, d. h. $\frac{\partial M}{\partial x} = 0$ sein. Es kann daher in 37 der Ausdruck

$$dQ = \frac{\tau_I}{r_I} \cdot r^3 \cdot V \cdot dy \tag{40}$$

in Analogie zur Strömung inkompressibler Flüssigkeiten als der „Fluß" bezeichnet werden. Der Fluß durch eine Strecke AM berechnet sich demnach zu

$$Q = \frac{\tau_I}{r_I} \cdot \int_{\text{I}}^{\text{y}} V \cdot r^3 \cdot dy. \tag{41}$$

Man geht bei der Berechnung am besten in der Weise vor, daß zunächst x-Linien gleichen Flusses schätzungsweise gezogen werden und hinterher nach 41 geprüft wird, ob der errechnete Fluß genügend genau mit dem angenommenen übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, so muß genau wie bei der entsprechenden Strömungsaufgabe der Verlauf der x-Linien nach Bedarf geändert und die Rechnung wiederholt werden.

II. Der zylindrische Stab

Es sei für einen solchen Stab beliebigen Querschnittes vorausgesetzt, daß bei der Belastung jeder Querschnitt sich als starres Ganzes drehe, so daß also in ihm weder gegenseitige Verschiebungen noch Auswölbungen auftreten. Es können dann in einen solchen Querschnitt in sich zurücklaufende Schubspannungslinien eingetragen werden (Abbildung 11), die wir als x-Linien bezeichnen wollen, während ihre Orthogonalen die y-Linien seien. Diese letzteren schneiden sich in einem Punkt, der als „neutraler Punkt" 0 bezeichnet werden soll.

Die x- und y-Linien können aufgefaßt werden als die Schnitte von zylindrischen Spannungsflächen (deren Erzeugende natürlich parallel zur Stabrichtung ist) mit der Zeichenebene. Betrachtet man nun einen kleinen Ausschnitt, der durch je zwei

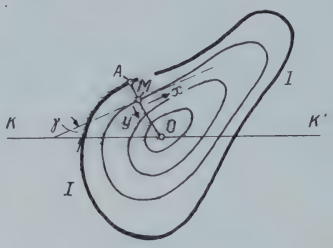


Abb. 11

benachbarte Spannungsflächen sowie durch zwei im Abstand dz gelegte Schnittebenen begrenzt ist, so fallen bei unbelastetem Stab die Projektionen $ABCD$ und $A'B'C'D'$ in der Zeichenebene zusammen, während bei der Belastung sich die beiden Flächen um den Winkel da gegeneinander verdrehen (Abbildung 12).

Diese Bewegung beispielsweise der Seite $A'D'$ kann zerlegt werden in eine Verschiebung aus der ursprünglichen Lage AD in Richtung der x-Linie nach A_1D_1 und in eine dazu senkrechte Bewegung von A_1D_1 in die Endlage $A'D'$. Das gleiche gilt für die Verschiebung der ganzen Fläche $A'B'C'D'$. Bei der Verschiebung der Fläche entsprechend dem Weg AA_1 in x-Richtung tritt nun eine Schubspannung von der Größe

$$\tau = G \cdot \frac{AA_1}{dz} = G \cdot \frac{r \cdot da \cdot \sin\varphi}{dz} \tag{42}$$

(wo $r = 0A$ der Abstand vom neutralen Punkt, φ der Winkel zwischen Fahrstrahl und x-Linie).

Bei der Verdrehung des Stababschnitts entsprechend der Verschiebung von A nach A' treten i. a. neben den obigen Schubspannungen nur so belanglose Kraftwirkungen in Querrichtung auf, daß sie vernachlässigt werden können und daher keine Schubspannungen in y-Richtung berücksichtigt zu werden brauchen.

Die Lage des neutralen Punktes ist dadurch bestimmt, daß die Schubspannungen τ in keiner Richtung eine resultierende Kraft ergeben dürfen, da ja lediglich ein Drehmoment wirkt. Infolgedessen gelten die Beziehungen

$$\iint \tau \cdot dx \cdot dy \cdot \cos\gamma = 0$$
$$\iint \tau \cdot dx \cdot dy \cdot \sin\gamma = 0,$$

wobei γ der Winkel zwischen der positiv gerichteten Tangente an eine x-Linie mit einer beliebig gewählten festen Richtung KK' ist. Bei Einführung von 42 und 3a können diese Gleichungen in der Form geschrieben werden:

$$\text{(43a)} \qquad \int_A^A \left(\int_I^o \frac{r \cdot \sin\varphi \cdot \cos\gamma}{V} \cdot dy \right) dx_I = 0.$$

$$\text{(43b)} \qquad \int_A^A \left(\int_I^o \frac{r \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma}{V} \cdot dy \right) dx_I = 0.$$

Damit könnte, falls bei unsymmetrischen Querschnitten die Lage des neutralen Punktes nicht von vornherein gegeben ist, die Richtigkeit seiner angenommenen Lage nachgeprüft werden. Es läßt sich aber hierfür noch eine etwas einfachere Beziehung finden.

Für das Drehmoment M gilt

$$M = \iint \tau \cdot dx \cdot dy \cdot r \cdot \sin\varphi.$$

Mit Beachtung von 42 und 3a läßt sich die Gleichung in der Form schreiben

$$\text{(44)} \qquad \mathrm{M} = \mathrm{G} \cdot \frac{d\alpha}{dz} \cdot \int_A^A \left(\int_I^o \frac{r^2 \cdot \sin^2\varphi}{V} \cdot dy \right) dx_I,$$

aus welcher Beziehung sich der zunächst unbekannte Wert $\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{dz}}$ und damit nach 42 die Schubspannung an beliebiger Stelle ergibt.

Auch hier ist die Nachprüfung der Richtigkeit des Verlaufs der zunächst schätzungsweise angenommenen x-Linien unerläßlich. Sie kann auf Grund folgender Überlegungen vorgenommen werden: Betrachtet man wieder den kleinen Stabausausschnitt, dessen Stirnflächen in Abbildung 12 durch $ABCD$ und $A'B'C'D'$ dar-

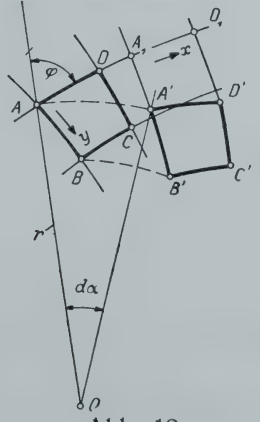


Abb. 12

gestellt sind, so wirken an diesen Stirnflächen die oben formulierten Schubspannungen τ, während die Seitenflächen $AA'D'D$ und $BB'C'C$ spannungsfrei sind. An den Seitenflächen $ABB'A'$ und $CDD'C'$ wirken hingegen Schubspannungen τ von gleicher Größe wie an den Stirnflächen (wie aus der Bedingung für das Momentengleichgewicht folgt). Die an den Seitenflächen $ABB'A'$ und $CDD'C'$ in Stabrichtung, jedoch einander entgegenwirkenden Schubkräfte dS und dS' müssen, da in dieser Richtung keine weitere Kraft an diesem Ausschnitt angreift, notwendigerweise einander gleich sein, so daß also längs zweier benachbarter x-Linien die Beziehung gilt

(45) $$dS = dy\ dz \cdot \tau = \text{konst.}$$

Diese Beziehung läßt sich, wie bekannt, als Kontinuitätsgleichung für die Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit auffassen, wenn τ die Strömungsgeschwindigkeit bedeutet.

Bei Einführung von 42 kann daher wieder (unter Weglassen der über den ganzen Stabquerschnitt unveränderlichen Werte G, da, dz)

$$dQ = r \cdot \sin\varphi \cdot dy$$

als der „Fluß" bezeichnet werden, so daß der ganze Fluß zwischen der Randlinie und einer beliebigen Spannungslinie

(46) $$Q = \int_I^y r \cdot \sin\varphi \cdot dy$$

ist. Da Q zwischen diesen beiden x-Linien für jede beliebige Querlinie den gleichen Wert haben muß, kann 46 zur Nachprüfung der Richtigkeit der angenommenen x-Linien dienen.

Wegen der Konstanz des Flusses zwischen zwei beliebigen x-Linien oder auch zwischen einer x-Linie und dem neutralen Punkt 0 müssen offenbar die Bedingungen 43a, b nicht nur für den Gesamtquerschnitt, sondern auch für den innerhalb irgendeiner x-Linie oder auch für den zwischen zwei beliebigen x-Linien liegenden Querschnitt gelten. Wählt man z. B. den durch die äußere Randlinie I und eine unendlich benachbarte x-Linie abgegrenzten Streifen, so muß ebenfalls

(47a) $$\int_A^A r \cdot \sin\varphi \cdot \cos\gamma \cdot dx \cdot dy = 0$$

(47b) $$\int_A^A r \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma \cdot dx \cdot dy = 0$$

sein. Hier kann unter Beachtung von 4 der Abstand der beiden benachbarten x-Linien

$$dy = \triangle y = \triangle y_0 \cdot \frac{\triangle y}{\triangle y_0} = \frac{\triangle y_0}{V'}$$

gesetzt werden. Die Bestimmung von V' läßt sich auf Grund folgender Überlegung etwas genauer als nach Gleichung 4 ausführen: Wegen dQ = konst. längs des betrachteten Streifens gilt

$$(48) \qquad \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 = \triangle y \left[r \cdot \cos\varphi \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \sin\varphi \cdot \frac{\partial r}{\partial x} \right] + r \cdot \sin\varphi \cdot \frac{\partial (\triangle y)}{\partial x} .$$

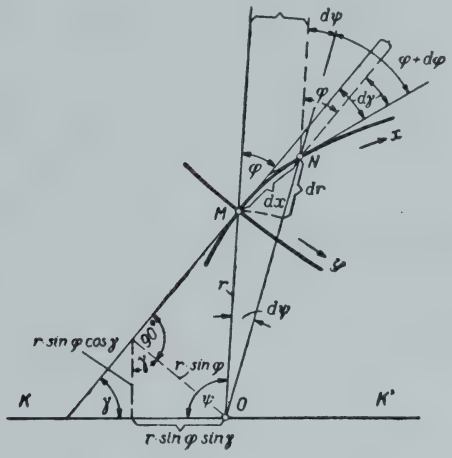


Abb. 13

Nach Abbildung 13 ist nun

$$d\varphi = -d\psi - d\gamma$$
$$r \cdot d\psi = dx \cdot \sin\varphi$$
$$\frac{d\gamma}{dx} = -\frac{1}{R_x}$$
$$\frac{dr}{dx} = \cos\varphi .$$

Mit Beachtung von 2b erhält man somit aus 48

$$(49) \qquad \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_x \cdot tg\,\varphi} .$$

Zur Berechnung von

$$V' = e^{\int_o^x \frac{dx}{R_y}} = e^{\int_o^x \frac{dx}{R_x \cdot tg\,\varphi}}$$

können somit an Stelle der unsicheren Werte R_y die sicheren Werte R_x der gegebenen Randlinie verwendet werden.

Die Gleichungen 47 lassen sich dann in der Form schreiben

(50a) $$F_1 = \int_A^A \frac{r \cdot \sin\varphi \cdot \cos\gamma}{V'} \cdot dx = 0.$$

(50b) $$F_2 = \int_A^A \frac{r \cdot \sin\varphi \cdot \sin\gamma}{V'} \cdot dx = 0.$$

Durch schätzungsweise Annahme einiger als „neutral" betrachteter Punkte und Ermittlung vorstehender Werte F durch Integration über den ganzen Umfang kann mittels Interpolation der wirkliche neutrale Punkt gefunden werden.

Der Rechnungsgang ist also folgender: Zunächst Ermittlung des neutralen Punktes, sodann Prüfung der Richtigkeit des angenommenen Verlaufs der Spannungslinien nach 41, schließlich Berechnung der Schubspannungen aus 44 und 42.

Anmerkungen

1) F l ü g e l: Zeitschr. für das gesamte Turbinenwesen 1915 S. 73 und 1919 S. 161.

2) Der „dicke" und der „runde" Stab wird an anderer Stelle untersucht werden. Auch auf andere Problemgruppen soll die Methode noch angewandt werden. — Es sei bei dieser Gelegenheit auch hingewiesen auf das Buch von W y s s: Kraftfelder in festen elastischen Körpern.

3) Die für mathematisch zweidimensionale Fälle zugrunde gelegte Arbeitshypothese über die Deformationen kann auch auf dreidimensionale Fälle verallgemeinert werden: Statt der Formbeständigkeit der Querlinien ist dann diejenige der Orthogonalflächen zu den x-Linien einzuführen. — Übrigens kann die Methode grundsätzlich auch zur näherungsweisen Berechnung beliebiger ebener und räumlicher Fachwerke angewandt werden.

4) $\triangle$c, ψ und in der Regel auch τ erreichen an sich nur niedrige Werte; außerdem verschwinden gerade am Rande, wo $\triangle c$ und ψ am größten werden, die Schubspannungen, während dort, wo τ seinen Höchstwert erreicht, wiederum $\triangle c$ und ψ verschwinden.

5) Auch die Bedingung, daß an der Randlinie II die Querspannung verschwinden muß $(\sigma_{y\,II} = 0)$, kann zur Kontrolle der Richtigkeit der angenommenen Längslinien dienen.

6) Siehe auch Sonntag, Zeitschr. f. angew. Math. u. Mech. 1929 S. 1.

Verdrehung und Knickung von offenen Profilen[1])

Von Professor Dr. Ing. Herbert Wagner

Vorwort

Offene Profile sind aus Blechen gezogene oder gewalzte Stäbe, die, im Gegensatz zu den geschlossenen (rohrförmigen) Profilen, keinen Hohlraum umschließen. Offene Profile werden im Metallflugzeugbau häufig verwendig, weil sie sich miteinander und mit Blechen einfach verbinden lassen; auch sind Konstruktionen aus offenen Profilen an allen Stellen zugänglich, also leicht zu konservieren und auszubessern.

Offene Profile besitzen jedoch im Gegensatz zu geschlossenen Profilen eine sehr geringe Torsionsfestigkeit. So ist bekanntlich die Torsionssteifigkeit eines aus einem Blech gezogenen offenen Profils, dessen Querschnittswölbung nicht verhindert wird, nur ebenso groß wie die des ebenen Blechstreifens, aus dem es hergestellt ist. Wird jedoch die bei der Verdrehung auftretende Querschnittswölbung z. B. an einem Ende des Profils verhindert, so treten im Profil Längsspannungen auf, die (zumindest bei verhältnismäßig geringer Stablänge) einen erheblichen Widerstand gegen Torsion geben können. Die Berechnung dieses Einflusses der Längsspannungen auf die Verdrehungsfestigkeit („Biegungsverdrehung") wurde für bestimmte Profilarten, insbesondere I-Träger, bereits durchgeführt[2]). Hier sollen die allgemeinen Grundlagen für offene Profile mit beliebiger Querschnittsform gegeben werden.

Man ordnet nun offene Profile meist so an, daß sie keine Torsionsbeanspruchung erfahren. Aber auch bei Verwendung als Druckstab brechen solche Profile oft, indem sie sich wegdrehen (kippen), noch lange bevor die Eulersche Knicklast oder die Streckgrenze erreicht it. Ganz besonders die im Flugzeugbau verwendeten Druckstäbe, deren Last im Verhältnis zur Stablänge (deren Kennwert[3]) im allgemeinen gering ist und die daher sehr dünnwandig ausgeführt werden, neigen zum Wegdrehen. Im folgenden wird nun dieses Wegdrehen berechnet und auf Grund dieser Ergebnisse kann man in jedem Fall die Profile zweckmäßig ausbilden und anordnen[4]).

Dieses Wegdrehen von Knickstäben führt bei zentrisch belasteten Stäben auf ein reines Stabilitätsproblem und hat Ähnlichkeit mit der Kippung von auf Biegung beanspruchten Stäben.

Verdrehung

Bezeichnungen:

E, G	Elastizitätsmodul, Gleitmodul (kg/cm²),
x	Koordinate in Richtung der Stabachse (cm),
φ	Verdrehungswinkel des Stabes,

M	äußeres Torsionsmoment (kg cm),
GJ_T	Drillungssteifigkeit des Profils bei ungehinderter Querschnittswölbung (kg cm²),
M_T	vom Querschnitt infolge der Drillungssteifigkeit aufgenommenes Torsionsmoment (kg cm),
τ_T	zur Drillungssteifigkeit gehörige Verdrehungsspannung (Schubspannung) (kg/cm²),
C_{bd}	Biegungsverdrehungswiderstand des Profilquerschnitts (cm⁶),
M_{bd}	vom Querschnitt infolge der Biegungsverdrehung aufgenommenes Torsionsmoment (kg cm),
ε_{bd}, σ_{bd}, τ_{bd}	infolge der Biegungsverdrehung auftretende Längsdehnung, Längsspannung, Schubspannung.

Die übrigen Bezeichnungen gehen aus den Abbildungen hervor.

Verdreht man ein Profil, dessen Querschnittswölbung n i c h t verhindert wird, so entstehen im Querschnitt Schubspannungen τ_T, die sich mit Hilfe der gewöhnlichen Theorie der Verdrehung prinzipiell für jede Querschnittsform berechnen lassen. Das durch diese Schubspannungen aufgenommene Torsionsmoment besitzt die Größe $M_T = \varphi' GJ_T$ (worin $\varphi' = \frac{d\varphi}{dx}$) und ist in diesem Falle gleich dem äußeren

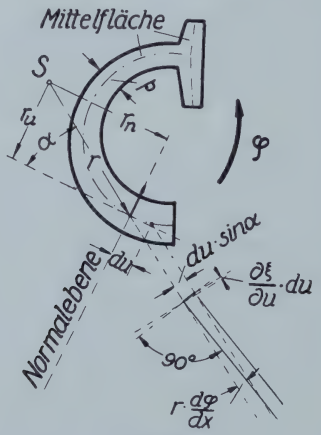


Abb. 1

Torsionsmoment M. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Querschnittsform des Profils und das Torsionsmoment M und folglich auch der spezifische Verdrehungswinkel φ' längs der Länge des Stabes konstant sind. In diesem Falle treten im Stabe keine Längsspannungen auf. Ferner treten (vgl. Abb. 1) bei offenen Profilen in der Fläche, die an jeder Stelle in der Mitte zwischen den beiden Oberflächen des Profils liegt (in der „Mittelfläche"), keine Schubspannungen auf und auch in den

Schnittebenen, die senkrecht zu dieser Fläche liegen (in den „Normalebenen"), treten keine Schubspannungen auf[5]). Profile, deren Wandstärke im Verhältnis zur abgewickelten Länge des Profilquerschnitts so gering ist, daß diese Behauptungen hinsichtlich der folgenden Betrachtungen über die Querschnittswölbung und über die Verteilung der Längsspannungen bei Biegungsverdrehung mit hinreichender Genauigkeit gelten, definieren wir (im Gegensatz zu Profilen mit vollem Querschnitt) als „offene Profile".

Die Koordinate u (Umfangskoordinate) messen wir in einem Querschnitt des Profils längs der Mittelfläche, die Koordinate n (in den Normalebenen gemessen) gibt den Abstand eines Punktes von der Mittelfläche an.

Wir bezeichnen mit S den Schubmittelpunkt des Profilquerschnitts[6]); die gerade Linie, die den geometrischen Ort der Schubmittelpunkte bildet, wollen wir Schubachse nennen.

Wir legen nun senkrecht zur Schubachse einen Querschnitt durch das Profil. Bei der Verdrehung bewegen sich die Punkte dieses Querschnitts infolge der Querschnittswölbung aus der Ebene um ξ heraus. Die vor der Verdrehung geraden Längsfasern des Profils gehen bei der Verdrehung in die Form von Schraubenlinien, deren Achse die Schubachse ist, über. Wir projizieren zwei benachbarte, in der Mittelfläche liegende Längsfasern nach der Verdrehung auf eine Ebene, die parallel zur Schubachse und senkrecht zur Verbindungslinie r der Schubachse mit den Fasern liegt. Die Projektion dieser Fasern schließt (vgl. Abbildung 1) mit der Projektion der Schubachse den Winkel $r\varphi'$ ein. Die beiden Punkte der Fasern, die ursprünglich in der Mittelebene lagen, liegen nun um ξ bzw. $\xi + \frac{\partial \xi}{\partial u} \cdot du$ von ihr entfernt. Da im Flächenstreifen, der zwischen den beiden Fasern liegt, keine Schubspannungen auftreten, gilt also

$$\frac{\partial \xi}{\partial u} = \sin \alpha \cdot r \cdot \varphi' = r_u \cdot \varphi',$$

so daß der Wölbungspfeil ξ_u der Punkte der Mittelfläche die Größe hat:

$$\xi_u = \varphi' \int^{u} r_u \cdot du.$$

Der Wölbungspfeil ändert sich aber auch längs n. In ähnlicher Weise läßt sich zeigen, daß $\frac{\partial \xi}{\partial n} = r_n \cdot \varphi'$, daß also an einer beliebigen Stelle u, n

$$(1) \qquad \xi = \xi_u + \xi_n = \varphi' \left(\int^{u} r_u \, du + \int_{o}^{n} r_n \, dn \right) = \varphi' \, (w_u + w_n) = \varphi' \cdot w.$$

Hierin bezeichnet w den Einheitswölbungspfeil (d. h. Wölbungspfeil für $\varphi' = 1$); w_u und w_n sind die beiden Anteile am Einheitswölbungspfeil, deren Bedeutung und Größe sich aus dieser Gleichung ergibt. Da der Abstand r_n der Normalfläche von der Schubachse im zweiten Integral eine Konstante ist, ist $w_n = r_n \cdot n$.

Wir haben bisher die untere Grenze des ersten Integrals noch nicht festgelegt, d. h. die Wölbungspfeile können noch alle um ein konstantes Maß geändert werden (Längsverschiebung des Profils). Diese untere Grenze wollen wir nun so wählen, daß die mittlere Längsverschiebung des Profils gleich Null ist, daß also

$$\text{(1a)} \qquad \int_F \xi \, dF = 0 \quad \text{bzw.} \quad \int_F w \, dF = 0$$

Da, wie leicht einzusehen, der Mittelwert von w_n ohnehin gleich Null ist, soll also gelten

$$\text{(1b)} \qquad \int_F w_u \, dF = \int_o^U w_u \, s \, . \, du = 0.$$

Hierin bedeutet U die abgewickelte Länge des Profilquerschnitts.

Biegungsverdrehung

Ist der spezifische Verdrehungswinkel φ' nicht konstant, ist also das Torsionsmoment längs der Länge des Profils veränderlich und ist die Querschnittwölbung des Profils (z. B. an einem Ende) verhindert, so treten zu den Schubspannungen τ_T der reinen Torsion noch Längsspannungen σ_{bd} und Schubspannungen τ_{bd} der Biegungstorsion hinzu.

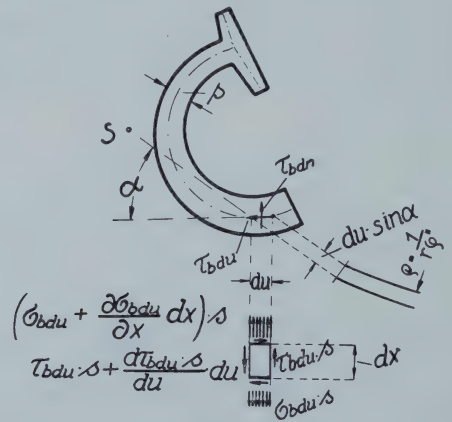


Abb. 2

Wir betrachten wieder (Abbildung 2) die beiden benachbarten Längsfasern der Mittelfläche. Der Streifen erscheint jetzt in der Projektion gekrümmt; die Krümmung beträgt $r\varphi''$. Infolge dieser Krümmung muß sich eine Faser des Streifens mehr denen als die andere (in ähnlicher Weise wie bei den Längsfasern des gebogenen Balkens), und zwar ist der Unterschied der Dehnungen der beiden

Fasern [7]) $d\varepsilon_{bd} = r\varphi'' \cdot du \cdot \sin\alpha$, also $\frac{\partial \sigma_{bd}}{\partial u} = E\varphi'' r_u$. Die Längsspannung in der Mittelfläche ist also

$$\sigma_{bdu} = E\varphi'' \int^{u} r_u \, du$$

Die untere Grenze des Integrals wollen wir später bestimmen.

Die Spannung σ_{bd} ist auch in Richtung von n veränderlich. In ähnlicher Weise erhalten wir $\frac{\partial \sigma_{bd}}{\partial n} = E\varphi'' r_n$, also $\sigma_{bdn} = E\varphi'' \cdot r_n n$. Hierin bedeutet σ_{bdn} die Längsspannung an einem Querschnitt des Profils an den Stellen einer Normalebene, abzüglich der mittleren Längsspannung, die (wegen der linearen Verteilung von σ_{bdn}) gleich ist der Längsspannung σ_{bdu} in der Mittelfläche an dieser Stelle u. Wir erhalten nun für die gesamte Längsspannung:

$$\sigma_{bd} = \sigma_{bdu} + \sigma_{bdn} = E\varphi'' \left(\int^{u} r_u \, du + r_n \cdot n \right) \tag{2}$$

Da auf das Profil keine äußere Längskraft wirkt, muß gelten

$$\int^{F} \sigma_{bd} \cdot dF = 0. \tag{2a}$$

Durch Vergleich von Gleichung (2) mit Gleichung (1) und (1a) erkennen wir, daß

$$\sigma_{bd} = E\varphi'' (w_u + w_n) = E\varphi'' w. \tag{2b}$$

Die Längsspannungen σ_{bd} dürfen auch kein resultierendes Biegungsmoment ergeben (denn ein solches greift am Stab nicht an). Es läßt sich leicht beweisen, daß diese Bedingung dann und nur dann erfüllt ist, wenn man die Größen r_u und r_n auf den Schubmittelpunkt bezieht, wenn sich also das Profil auch beim Auftreten von Längsspannungen um die Schubachse verdreht. Dies ist also der Fall.

Diese bei der Verdrehung auftretenden Längsspannungen ergeben einen Widerstand gegen Verdrehung, den wir jetzt berechnen wollen. Wir betrachten dazu einen Stab von der Länge L. An den Enden dieses Stabes sollen Torsionsmomente M angreifen und auch längs seiner Länge sei der Stab durch äußere Torsionsmomente von der Größe $-\frac{dM}{dx} = m$ belastet. Die im Stab auftretende innere Formänderungsarbeit ist

$$A_i = A_{iT} + A_{ibd} = \frac{G \cdot J_T}{2} \int_0^L \varphi'^2 dx + \frac{1}{2E} \int_0^L \int^{F} \sigma_{bd}^2 dx dF.$$

Das erste Glied der rechten Seite gibt die Formänderungsarbeit der Schubspannungen τ_T an, während das zweite Glied den infolge der Biegungstorsion auftretenden Längsspannungen σ_{bd} entspricht. Die Formänderungsarbeit, die denjenigen Schubspannungen τ_{bd} entspricht, die durch die Veränderung von σ_{bd} in x-Richtung bedingt werden (s. weiter unten), ist vernachlässigt [8]).

Bei Beachtung von Gleichung (2b) erhalten wir

$$(3) \qquad A_{ibd} = \frac{1}{2} E \int_{F} w^2 dF \cdot \int_{o}^{L} \varphi''^2 dx = \frac{1}{2} E C_{bd} \int_{o}^{L} \varphi''^2 dx$$

wobei wir statt des einen Integrals der Kürze halber C_{bd} geschrieben haben.

Wir variieren nun den Formänderungszustand um $\delta\varphi$, wobei $\delta\varphi$ längs der Länge des Stabes beliebig veränderlich sei; wir wollen aber voraussetzen, daß

$$(4) \qquad \text{für } x = 0 \text{ und } x = L \qquad \delta\varphi = 0 \text{ und } \delta\varphi' = 0.$$

Nach dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten gilt $\delta A_i - \delta A_a = 0$, wenn A_a die Arbeit der äußeren Torsionsmomente bedeutet, wobei jedoch wegen Gleichung (4) die a m E n d e des Stabes angreifenden Torsionsmomente keine Arbeit leisten. Wir erhalten

$$\frac{1}{2} G J_T \int_{o}^{L} \delta(\varphi'^2) dx + \frac{1}{2} E C_{bd} \int_{o}^{L} \delta(\varphi''^2) dx - \int_{o}^{L} m \, \delta\varphi \cdot dx = 0.$$

Durch Ausführung der Variation und durch partielle Integrationen (bei Beachtung von Gleichung 4) erhalten wir nach Zusammenfassung unter ein gemeinsames Integralzeichen

$$\int_{o}^{L} (- G J_T \varphi'' + E C_{bd} \varphi'''' - m) \, \delta\varphi \cdot dx = 0.$$

Da dieses Integral für jede beliebige Funktion $\delta\varphi$ verschwinden muß, lautet die Differentialgleichung der Biegungstorsion

$$(5) \qquad E C_{bd} \cdot \varphi'''' - G J_T \varphi'' = + m = - \frac{dM}{dx}$$

Durch einmalige Integration erhalten wir

$$(5a) \qquad - E C_{bd} \cdot \varphi''' + G J_T \varphi' = M_{bd} + M_T = M.$$

Wir erkennen aus dieser Gleichung, daß den infolge der Biegungstorsion auftretenden Längsspannungen σ_{bd} im Querschnitt ein inneres Torsionsmoment entspricht von der Größe $M_{bd} = - E C_{bd} \varphi'''$, wobei (vgl. Gleichung 3)

$$(6) \qquad C_{bd} = \int_{F} w^2 dF$$

(C_{bd} = Biegungsverdrehungswiderstand).

Nach dieser rein formalen Ableitung für C_{bd} wollen wir uns noch eine Vorstellung vom Zustandekommen des Torsionsmoments M_{bd} machen. Da die Längsspannungen σ_{bd} im allgemeinen in x-Richtung veränderlich sind, müssen im Querschnitt Schubspannungen τ_{bd} auftreten, die wir in die Schubspannungen τ_{bdu} in-

folge der Änderung der mittleren Längsspannung σ_{bdu} und in die Schubspannungen τ_{bdn} infolge der Längsspannung σ_{bdn} zerlegen.

In ähnlicher Weise wie beim gewöhnlichen Biegungsträger erkennen wir aus dem Gleichgewicht des Streifens von der Breite du und der Länge dx (vgl. Abbildung 2), daß den veränderlichen Längsspannungen σ_{bdu} Schubspannungen τ_{bdu} entsprechen müssen, die in den Normalebenen in Richtung der Stabachse und im Querschnitt in Richtung der u-Achse wirken; und zwar ist (vgl. auch Gleichung 2 bzw. 2b)

$$\mathrm{d}\,(\tau_{bdu} \cdot \mathrm{s}) = \frac{\partial\, \sigma_{bdu}}{\partial\, \mathrm{x}} \cdot \mathrm{dF} = \mathrm{E}\varphi''' \cdot \mathrm{w}_u \cdot \mathrm{dF}.$$

An einer Stelle u ist also

$$\tau_{bdu} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{E}\varphi''' \int_o^u \mathrm{w}_u \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{du}. \tag{6a}$$

Das durch diese Schubspannungen aufgenommene Moment berechnet sich nun zu

$$\mathrm{M}_{bdu} = \int^F \tau_{bdu} \cdot \mathrm{r}_u \cdot \mathrm{dF} = \int_o^U \mathrm{r}_u \cdot \mathrm{du} \cdot \tau_{bdu} \cdot \mathrm{s} = \mathrm{E}\varphi''' \int_o^U \mathrm{r}_u \, \mathrm{du} \int_o^u \mathrm{w}_u \cdot \mathrm{s} \cdot \mathrm{du}.$$

Durch partielle Integration bei Beachtung von Gleichung (1) und (1b) erhalten wir

$$\mathrm{M}_{bdu} = -\mathrm{E}\varphi''' \int^F \mathrm{w}_u^2 \, \mathrm{dF} = -\mathrm{E}\varphi''' \, \mathrm{C}_{bdu}.$$

Die Schubspannungen infolge der Veränderlichkeit von σ_{bdn} wirken in Richtung von n und haben parabolischen Verlauf (in gleicher Weise wie beim gebogenen Balken vom rechteckigen Querschnitt). Ihr Moment läßt sich in ähnlicher Weise wie oben berechnen zu

$$\mathrm{M}_{bdn} = -\mathrm{E}\varphi''' \int^F \mathrm{w}_n^2 \, \mathrm{dF} = -\mathrm{E}\varphi''' \, \mathrm{C}_{bdn}.$$

Nun ist $\mathrm{M}_{bd} = \mathrm{M}_{bdu} + \mathrm{M}_{bdn}$ und da, wie leicht zu zeigen, $\mathrm{C}_{bd} = \mathrm{C}_{bdu} + \mathrm{C}_{bdn}$, stimmt das Ergebnis dieser Betrachtung mit Gleichung (6) überein. Wir können also den Biegungsverdrehungswiderstand C_{bd} in die beiden Teile

$$\mathrm{C}_{bdu} = \int^F \mathrm{w}_u^2 \, \mathrm{dF} \quad \text{und} \quad \mathrm{C}_{bdn} = \int^F \mathrm{w}_n^2 \, \mathrm{dF} = \frac{1}{12} \int_o^U \mathrm{s}^3 \, \mathrm{r}_n^2 \, \mathrm{du} \tag{6b}$$

zerlegen.

Es sei noch erwähnt, daß die Schubspannungen τ_{bd} als resultierende Querkraft Null ergeben.

Da die Lösung der Differentialgleichung Gleichung (5) auch hinsichtlich dieses speziellen Problems durchaus bekannt ist, brauchen wir darauf nicht näher einzugehen.

Wegdrehen von Druckstäben

Wird ein verhältnismäßig dünnwandiges offenes Profil (z. B. ein Winkelprofil) gedrückt, so neigt jeder einzelne Flansch zum Ausknicken in Richtung senkrecht zu seiner Ebene (Abbildung 3). Die an der Kante des Winkelprofils liegende Seite des Flansches stützt sich jedoch gegen den anderen Flansch, der hinsichtlich solcher Beanspruchungen ein sehr großes Widerstandsmoment hat und folglich das Ausknicken des ersteren Flansches an dieser Stelle verhindert; und umgekehrt.

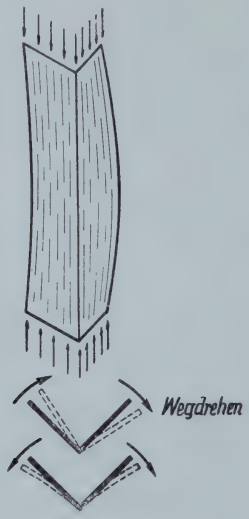


Abb. 3

Es sind nun zwei Knickungsformen möglich: erstens, daß beide Flansche nach derselben Richtung (im gleichen Drehsinn) ausknicken, das Profil sich also verdreht; zweitens, daß beide Flansche im entgegengesetzten Drehsinn ausknicken. Bei dieser zweiten Art der Knickung wird der Querschnitt des Winkelprofils verformt und die Formänderungsarbeit ist daher für diesen Fall größer. Und da von zwei möglichen Knickungsformen immer diejenige (zuerst) eintritt, der bei gleicher Arbeit der äußeren Lasten die kleinere Formänderungsarbeit entspricht, so tritt also lediglich die erste Art der Knickung, also Verdrehung des Profils, auf.

Wir wollen nun den allgemeinen Fall besprechen. Ein ursprünglich gerades offenes Profil stehe unter der Wirkung einer im allgemeinen exzentrisch wirkenden Druckkraft P, deren Wirkungslinie parallel zur Stabachse verlaufe. Wir bezeichnen mit $\sigma_{P0} = \frac{P}{F}$ die mittlere Druckspannung, mit σ_P die über den Querschnitt veränderliche resultierende Druck- und Biegungsspannung und setzen diese einfach zu berechnenden Spannungen als bekannt voraus.

Für die weitere Rechnung wollen wir annehmen, daß die durch die Exzentrizität von P hervorgerufene Ausbiegung des Stabes und der Verdrehungswinkel φ des Stabes kleine Größen seien; quadratische Glieder und Produkte dieser Größen oder deren Ableitungen sind also vernachlässigt.

Wir betrachten das Gleichgewicht der inneren Kräfte mit den äußeren Kräften an einem Querschnitt des Profils. Aus der Betrachtung dieses Gleichgewichts ergibt sich (vgl. das Folgende), daß die Verdrehung des Profils um die Schubachse stattfinden muß.

Infolge der Verdrehung treten Längsspannungen σ_{bd} auf, die zur Resultierenden Null ergeben (vgl. Geichung 2a). Die infolge der Verdrehung auftretenden Schubspannungen ergeben als Resultierende ein reines Torsionsmoment von der Größe (vgl. Gleichung 5a).

$$M_{bd} + M_T = -E\,C_{bd} \cdot \varphi''' + G \cdot J_T \cdot \varphi'.$$

Die Spannungen σ_P verlaufen in Richtung der Längfasern des Profils, sie sind sind also erstens infolge der Verdrehung des Profils und zweitens infolge der Verbiegung des Profils schräg zur ursprünglichen Achse geneigt. Die horizontalen Komponenten dieser Spannungen wollen wir jetzt näher betrachten.

1. Horizontale Komponenten von σ_P infolge der Verdrehung. Der Neigungswinkel einer Faser infolge der Verdrehung ist $r\varphi'$, die horizontale Komponente von σ_P ist also $\sigma_P \cdot r\varphi'$, ihre Richtung ist senkrecht zu r. Diese Spannungen ergeben ein Moment um den Schubmittelpunkt von der Größe

$$M_{P\varphi} = \varphi' \int^{F} r^2\,\sigma_P\,dF = \varphi' \cdot \sigma_{P0} \int^{F} \frac{\sigma_P}{\sigma_{P0}}\,r^2\,dF = \varphi' \cdot P \cdot i_{SP}^2,$$

wobei wir der Kürze halber für das leicht auswertbare Integral

$$\frac{1}{F} \int^{F} \frac{\sigma_P}{\sigma_{P0}}\,r^2\,dF = i_{SP}^2 \tag{7}$$

gesetzt haben. Für zentrisch wirkende Kraft P ist $M_{P\varphi} = \sigma_{P0} \cdot J_S$, worin J_S das polare Trägheitsmoment des Profilquerschnitts um die Schubachse bedeutet. Das Auftreten dieses Moments $M_{P\varphi}$ ist die Ursache für das Wegdrehen von zentrisch gedrückten offenen Profilen.

2. Horizontale Komponenten von σ_P infolge der Verbiegung. Die Hauptträgheitsmomente des Profilquerschnitts bezeichnen wir mit J_η und J_ζ. Die Koordinaten in Richtung der Hauptträgheitsachsen, vom Schubmittelpunkt aus gerechnet, bezeichnen wir mit η_S und ζ_S. Die Durchbiegung des Profils in Richtung dieser Achsen bezeichnen wir mit y_η und y_ζ. Die übrigen Bezeichnungen gehen aus Abbildung 4 hervor.

Das Biegungsmoment infolge der Exzentrizität von P zerlegen wir in die beiden Komponenten um die Hauptträgheitsachsen. Der Biegungswinkel infolge der Verbiegung um die η-Achse ist

$$\frac{dy_\eta}{dx} = \int^{x} \frac{d^2y}{dx^2} \cdot dx = -\frac{P \cdot \zeta_{0P}}{EJ_\eta} \int^{x} dx.$$

Die Grenzbedingung für dieses Integral lassen wir, da wir später differenzieren werden, frei. Die horizontalen Komponenten $\sigma_P \cdot \frac{dy_\eta}{dx}$ von σ_P wirken in Richtung

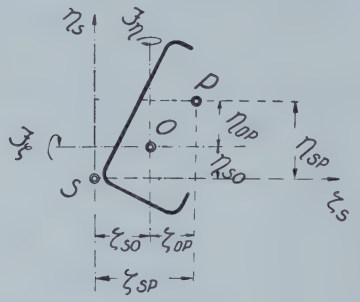


Abb. 4

der ζ-Achse; sie ergeben ein Torsionsmoment um den Schubmittelpunkt von der Größe

$$\int^{F} \sigma_P \cdot \frac{dy_\eta}{dx} \cdot \eta_S \cdot dF = \frac{dy_\eta}{dx} \cdot P \cdot \eta_{SP} = -\frac{P^2}{E} \cdot \frac{\zeta_{0P} \cdot \eta_{SP}}{J_\eta} \cdot \int^{x} dx.$$

In ähnlicher Weise berechnen wir das Torsionsmoment infolge der Verbiegung um die ζ-Achse. Für das gesamte Torsionsmoment infolge der Verbiegung erhalten wir dann

$$(8) \qquad M_{Pb} = -\frac{P^2}{E}\left(\frac{\zeta_{0P} \cdot \eta_{SP}}{J_\eta} - \frac{\eta_{0P} \cdot \zeta_{SP}}{J_\zeta}\right) \cdot \int^{x} dx = -\frac{P^2 B}{E} \cdot \int^{x} dx$$

wobei wir B als Abkürzung für den Klammerwert eingeführt haben.

Durch die Wanderung des Profilschwerpunkts infolge der Verdrehung um den Schubmittelpunkt und auch infolge der Verbiegung ändert sich die Exzentrizität von P längs des Stabes und es entstehen dadurch zusätzliche Biegungsmomente. Es sei hier ohne Beweis gesagt, daß die durch diese zusätzlichen Biegungsmomente hervorgerufenen Längsspannungen entsprechend den Annahmen kleiner Verdrehung und Ausbiegung kein Moment um den Schubmittelpunkt ergeben, daß aber die ihnen entsprechenden Schubspannungen im Schubmittelpunkt angreifende Querkräfte ergeben, die den Querkräften aus den unter Punkt 1) und 2) besprochenen horizontalen Komponenten der Längsspannungen gerade das Kräftegleichgewicht halten, so daß also im Querschnitt tatsächlich in jeder Hinsicht Gleichgewicht mit den äußeren Kräften besteht, vorausgesetzt, daß die Bedingung

$$M_T + M_{bd} = M_{P\varphi} + M_{Pb}$$

erfüllt ist.

Wir wollen noch den sehr wichtigen Fall betrachten, daß das Profil gegen Verdrehung elastisch gestützt ist, daß also an jeder Stelle x ein äußeres Torsionsmoment $m = \frac{m}{\varphi} \cdot \varphi$ ausgeübt wird, das der Verdrehung an dieser Stelle proportional und ihr entgegengesetzt gerichtet ist; $\frac{m}{\varphi}$ sei also gegeben und sei längs der Länge des ganzen Profils konstant. Betrachten wir wieder das Gleichgewicht am Querschnitt, so kommt also noch das Torsionsmoment

$$-M_m = \int^{x} \frac{m}{\varphi} \cdot \varphi \, dx$$

hinzu. Setzen wir nun

$$M_T + M_{bd} = M_{P\varphi} + M_{Pb} - M_m$$

und differenzieren wir nach x, so erhalten wir die Differentialgleichung des Wegdrehens:

$$\varphi'''' \cdot E C_{bd} + \varphi'' \, (P \cdot i_{SP}^2 - G J_T) + \varphi \cdot \frac{m}{\varphi} = \frac{P^2}{E} \cdot B. \tag{8}$$

Die Lösungen dieser Differentialgleichung sind bekannt; wir können uns daher auf den technisch wichtigsten Fall, daß die Querschnittswölbung an den Stabenden **nicht** verhindert ist, beschränken:

Grenzbedingung

$$\text{für } x = 0 \text{ und } x = L \text{ sei } \varphi = 0 \text{ und } \varphi'' = 0.$$

Wir vernachlässigen zuerst den Anteil M_{Pb} infolge der Ausbiegung des Profils, setzen also $B = 0$. Ist keine elastische Stützung vorhanden, also $\frac{m}{\varphi} = 0$, so lautet die Lösung der Differentialgleichung $\varphi = \varphi_0 \sin \frac{\pi x}{L}$ (φ_0 = Verdrehungswinkel in der Mitte) und wir erhalten durch Einsetzung in Gleichung (8) die Knicklast P (den Eigenwert):

$$P = \frac{1}{i_{SP}^2} \left(G J_T + \frac{\pi^2}{L^2} E C_{bd} \right) \tag{9}$$

Ist elastische Stützung vorhanden, so zeigt die Rechnung (in gleicher Weise wie beim elastisch gestützten gewöhnlichen Knickstab), daß je nach der Größe der elastischen Stützung und der Länge des Stabes sich eine oder mehrere Verdrehungswellen ausbilden. Setzen wir also die Länge einer Welle gleich $\frac{L}{n}$ (n = ganze Zahl), also $\varphi = \varphi_0 \sin \frac{n \pi x}{L}$, so erhalten wir die Knicklast

$$P = \frac{1}{i_{SP}^2} \left(G J_T + \frac{n^2 \pi^2}{L^2} E C_{bd} + \frac{L^2}{n^2 \pi^2} \cdot \frac{m}{\varphi} \right) \tag{9a}$$

In Abbildung 5 haben wir für verschiedene n und verschiedene L die Knicklasten dargestellt. Da der Stab immer bei derjenigen Wellenzahl wegdreht, bei der die Knicklast am kleinsten ist, wächst die Zahl der Wellen mit wachsender Stablänge, wobei bei großen Stablängen die Knicklast nahezu unabhängig von der

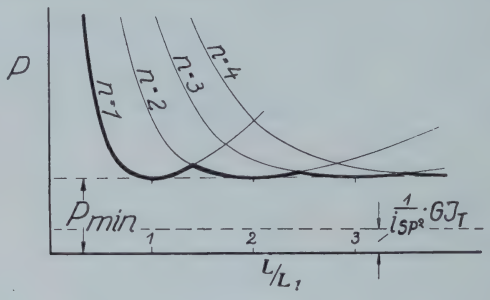


Abb. 5

Stablänge wird. Für große Stablängen erhalten wir die zu den Minima der Knicklast gehörigen Wellenlängen L_1 durch Differentiation von Gleichung (9a) $\left(\frac{dP}{dL/n} = 0\right)$, zu

$$\frac{L}{n} = L_1 = \pi \sqrt[4]{\frac{EC_{bd}}{\frac{m}{\varphi}}} \tag{10}$$

Durch Einsetzen dieses Wertes in Gleichung (9a) erhalten wir die Größe der Knicklast (genauer gesagt die Größe des Minimums) für $L \geqq L_1$:

$$P_{min} = \frac{1}{i_{SP}^2}\left(GJ_T + 2\sqrt{\frac{m}{\varphi} EC_{bd}}\right) \tag{10a}$$

Für $L \leqq L_1$ bildet sich nur eine Welle aus, also

$$P = \frac{1}{i_{SP}^2}\left(GJ_T + \frac{\pi^2}{L^2} EC_{bd} + \frac{L^2}{\pi^2} \cdot \frac{m}{\varphi}\right) \tag{10b}$$

Ist die auf den Stab wirkende Last kleiner als die durch diese Gleichung gegebene Knicklast, so verdreht sich der Stab überhaupt nicht (immer vorausgesetzt, daß $B = 0$); erreicht die Last jedoch die angegebene Größe, so bricht er plötzlich infolge Wegdrehens (reines Stabilitätsproblem).

Die Berücksichtigung der seitlichen Ausbiegung des Stabes ($B \neq 0$) führt auf wesentlich kompliziertere Lösungen. Und zwar erhalten wir vier Formen der Lösung, je nachdem ob der Stab gegen Verdrehung elastisch gestützt ist oder nicht und ob P klein ist oder bereits in der Nähe der Knicklast liegt. Aber diese Lösungen zeigen, daß φ erst dann über alle Maßen groß wird, wenn P die durch die vorigen Gleichungen angegebene Größe erreicht, die wir also auch für

diesen Fall als Knicklast bezeichnen können. Die Exzentrizität ist dabei die Berechnung des Wertes i_{SP} nach Gleichung (7) zu berücksichtigen.

Wir erhalten z. B. für nicht elastisch gestützten Stab und für große Last P die Lösung

$$(11)\quad \varphi = \frac{P^2 B C_{bd}}{(P i_{SP}^2 - G J_T)^2}\left[\frac{1-\cos\omega L}{\sin\omega L}\sin\omega x + \cos\omega x - 1 - \frac{\omega^2 x}{2}(L-x)\right]$$

$$(11a)\quad \omega^2 = \frac{P i_{SP}^2 - G J_T}{E C_{bd}}$$

Wir erkennen, daß für $\omega L = \pi$ die Knicklast erreicht ist und erhalten daraus den in Gleichung (9) angegebenen Wert von P. Für kleinere Lasten P können wir aus Gleichung (11) den Formänderungs- und Spannungszustand berechnen und feststellen, wann im Material die Streckgrenze erreicht ist, der Stab also in Wirklichkeit bricht.

Von der Angabe der Lösungen für die anderen Fälle wollen wir absehen.

Es sei darauf hingewiesen, daß bei zentrisch belasteten Knickstäben keine Koppelung zwischen der Knickung (nach Euler) und dem Wegdrehen eintritt; das Profil ist entweder auf Knickung (nach Euler) oder auf Wegdrehen zu berechnen, je nachdem welcher Erscheinung die kleinere Knicklast entspricht. Bei langen exzentrisch gedrückten Stäben kann jedoch die Ausbiegung des Stabes infolge der Exzentrizität so groß werden, daß die Spannungsverteilung in der Mitte des Stabes wesentlich anders ist als an den Enden. Für diesen Fall wird empfohlen, die Spannungsverteilung in der Mitte des Stabes ohne Berücksichtigung des Wegdrehens zu berechnen und dann diese Spannungsverteilung der Berechnung des Wegdrehens zugrunde zu legen.

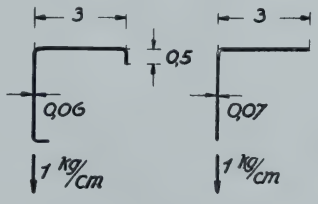


Abb. 6

Um ein Bild von den einzelnen Einflüssen zu geben, sind in Tabelle 1 die theoretischen Knicklasten für zwei Duraluminprofile von gleicher Querschnittsfläche $F = 0{,}42$ cm² und gleicher Schenkelbreite 3 cm angegeben. Die Profile sind in Abbildung 6 dargestellt. Bei nicht gegen Verdrehung elastisch gestützten Profilen ist bei kleinen Längen das Profil mit Bördelung wegen des größeren C_{bd} erheblich überlegen, bei großen Längen dagegen unterlegen, weil dann der Wert C_{bd} nur geringen Einfluß hat (vgl. Gleichung 9), beim gebördelten Profil aber ein größerer Teil der Querschnittsfläche weit vom Schubmittelpunkt angeordnet ist und das Profil wegen der kleineren Wandstärke geringere Drillungssteifigkeit besitzt.

Tabelle 1.

Querschnittsform	$1000\ J_T$	$1000\ C_{bd}$	i_{mP}^2	Theoretische Knicklast P für $\frac{m}{\varphi}=0$			$\frac{m}{\varphi}=3$		
	cm^4	cm^6	cm^2	L=20	40	80	20	40	80
⌐	0,695	0,515	3	65	63	62	86	86	86
⌐	0,540	35,7	4	188	73	44	218	171	171

Werden solche Profile als Holme von Blechwandträgern verwendet, deren Stegblech sich bei Belastung durch Querkräfte in Zugdiagonalenfelder legt[9]), also seitliche Zugkräfte auf das Profil ausübt, so entstehen bei der Verdrehung rückführende Momente, die der Größe der Verdrehung porportional sind. Sind z. B. unsere Profile durch an den Flanschen befestigte Bleche mit 1 kg/cm seitlich belastet, so ist $\frac{m}{\varphi}=3$. Für diesen Wert sind, ohne Berücksichtigung der Biegungsmomente, die Knicklasten der Stäbe angegeben. Man sieht, daß jetzt das gebördelte Profil bei allen Längen günstiger ist, denn nach Gleichung (10a) erhöht der Wert C_{bd} die Knicklast ganz besonders dann, wenn elastische Stützung vorhanden ist.

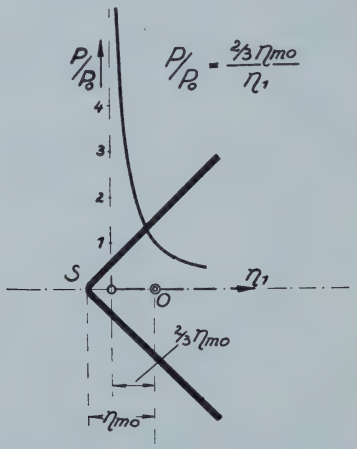


Abb. 7

Um den großen Einfluß von exzentrischer Beanspruchung auf die Knicklast zu zeigen, sind in Abbildung 7 die Knicklasten P für ein in der Symmetrieebene exzentrisch belastetes Winkelprofil (also $B=0$) im Verhältnis zur Knicklast P_0 des zentrisch belasteten Profils aufgetragen. Je näher die Kraft an der Kante des Profils angreift, desto größer wird die Knicklast und schließlich kommt Wegdrehen überhaupt nicht mehr in Frage.

Ferner sei erwähnt, daß bei Versuchen bei zwischen parallelen Platten gedrückten Profilen das Wegdrehen auch bei der berechneten Last beginnt, nach dem Wegdrehen die Schenkel aber entlastet werden, die Wirkungslinie der Druckkraft also gegen die Kante wandert und dadurch erhöhte Druckkraft getragen werden kann. Dieser Vorgang läßt sich verhältnismäßig einfach berechnen.

Werden sehr dünnwandige Winkelprofile (oder Profile ähnlichen Querschnitts) in solcher Weise exzentrisch gedrückt, daß die Flansche hoch belastet werden, die Kante dagegen niedrig belastet wird, so kommt es vor, daß dann die beiden Flansche in entgegengesetzten Drehsinn ausknicken (das Profil sich also nicht verdreht). Dieser Vorgang läßt sich leicht erklären, seine Berechnung ist jedoch schwierig. Die Knicklast ist dann kleiner, als wenn das Profil wegdrehen würde.

Schließlich sei bemerkt, daß nur solche Profile zum Wegdrehen neigen, bei denen der Wert C_{bd}/i_{SP}^2 klein ist gegenüber dem Trägheitsmoment des Profilquerschnitts (vgl. Gleichung 9). Bei anderen Profilen tritt, falls nicht zuerst die Streckgrenze überschritten wird, entweder Knickung (nach Euler) ein oder (z. B. bei ⊏-Profilen) es verbeult jeder einzelne Flansch, ohne daß das Profil sich wegdrehen würde. Sind die Flansche des ⊏-Profils gebördelt, so kann man diese Flansche als am Mittelsteg elastisch eingespannt auffassen und mit Hilfe vorstehender Grundlagen das Wegdrehen (Verbeulen) des Flansches zumindest näherungsweise berechnen. Für die Berechnung der Verbeulung von nicht gebördelten Flanschen kann man die Methoden benutzen, die Timoschenko für starr eingespannte oder gar nicht eingespannte Flanschen angegeben hat[10]).

Anmerkungen

1) Die Arbeit erscheint gleichzeitig in etwas ausführlicherer Form in der Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt. Dort sind auch die Ergebnisse von Versuchen, die im Flugtechnischen Institut der Technischen Hochschule Danzig ausgeführt sind, mitgeteilt.

2) Die diesbezügliche Arbeit von C. Weber, Zeitschrift f. angew. Math. u. Mech. 1926, S. 85, ist mir erst nach Fertigstellung dieser Arbeit bekannt geworden. Die Ergebnisse von C. Weber sind in vorliegender Arbeit als Sonderfälle enthalten. Hinsichtlich der grundlegenden Annahmen stimmt die Arbeit von C. Weber mit vorliegender Arbeit überein, nur ist in meiner Arbeit der Einfluß der Veränderung der Längsspannungen der Biegungsverdrehung über die Wandstärke exakter berücksichtigt (vgl. den Anteil C_{bdn}, Gl. 6b, am Wert C_{bd}, Gl. 6).

Ferner sei auf die Arbeit von H. Reissner, ZFM 1926, S. 384, hingewiesen, in der das Problem der Biegungsverdrehung für geschlossene Profile, insbesondere solche von kastenförmigem Querschnitt, behandelt ist.

3) Vgl. Aufsatz des Verf. ZFM 1928, S. 241.

4) Für zentrisch belastete Winkelprofile ist dieses Wegdrehen bereits von P. Bryan untersucht worden. Vgl. z. B. Rudolf Mayer, „Die Knickfestigkeit". Berlin 1921, S. 35.

5) Die in den Normalebenen an den Enden des Querschnittes auftretenden Schubspannungen beschränken sich bei kleiner Wandstärke auf einen kleinen Bereich; ihr Einfluß auf diese Betrachtungen der Biegungsverdrehung ist auch deswegen gering, weil die Änderung der Längsspannungen σ_{bd} der Biegungsverdrehung in Richtung dieser Ebenen (in Richtung n) nur untergeordnete Bedeutung besitzt (C_{bdn} ist klein gegenüber C_{bdu}, vgl. Gl. 6b).

6) Vgl. z. B. Föppl, „Drang und Zwang", 1928, S. 121.

7) Diese Gleichung gilt nur dann, wenn die Veränderlichkeit in x-Richtung der infolge von $\partial\sigma_{bd}/\partial x$ auftretenden Schubspannungen τ_{bd} (vgl. Gl. 6a) vernachlässigt werden kann, also bei nicht zu kurzen Profilen; vgl. auch die nächste Fußnote.

8) Diese Vernachlässigung entspricht der üblichen Annahme der Biegungslehre, daß man bei einem nicht zu kurzen Biegungsbalken die Formänderung infolge des Schubes gegenüber der Formänderung infolge der Biegung vernachlässigen kann.

9) Vgl. Aufs. des Verf. ZFM 1929, Heft 8—12 und Jahrb. d. W.G.L. 1928, Seite 113.

10) Vgl. z. B. Auerbach-Hort, Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, 1929, Bd. IV, Lief. 1, S. 128.

THE LIBRARY OF THE
JAN 6 1931
UNIVERSITY OF ILLINOIS

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1

gibt an: Besucherzahlen je Halbjahr.

Vorkriegszeit.

Studierende. a.	189	309	370	434	460	500	498	553	611	644
Hörer. a	57	62	96	96	102	83	72	70	79	66
Gastteilnehmer	353	151	408	152	409	210	413	220	500	140
Summe	599	522	874	662	971	793	983	843	1190	850
Halbjahr	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1904	1905		1906		1907		1908		1909

Studierende a.	647	624	628	634	630	590	625	665	676	675
Hörer. a.	80	66	76	58	61	49	61	72	58	56
Gastteilnehmer	607	102	631	103	612	79	731	76	585	89
Summe.	1334	792	1335	795	1303	718	1417	813	1319	820
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1909	1910		1911		1912		1913		1914

Kriegszeit.

Studierende a.	116	98	67	78	78	71	95	133	170	
" b.	487	494	488	479	498	537	543	570	532	
Hörer. a.	5	6	8	5	3	5	11	10	13	
" b.	47	47	47	49	45	44	43	46	39	
Gastteilnehmer.	165	75	241	106	421	166	493	197	544	
Summe.	820	720	851	717	1045	823	1185	956	1298	
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W I	
Jahr.	1914	1915		1916		1917		1918	1918/19	

Übergangszeit.

Studierende a.	483	662	833	810	839	954	1089	1172		
" b.	277	225	190	179	23	31	20	27		
Hörer. a.	26	43	52	83	130	134	131	98		
Gastteilnehmer.	428	229	347	91	214	77	138	125		
Summe.	1214	1159	1422	1163	1206	1196	1378	1422		
Halbjahr.	W I	S	W	S	W	S	W	S		
Jahr.	1918/19	1919		1920		1921		1922		

Nachkriegszeit.

Studierende. a.	1651	1638	1476	1335	1522	1414	1566	1488	1574	1515
" b.	17	33	124	159	63	131	73	131	70	125
Hörer a.	121	97	75	41	64	47	59	39	39	33
Gastteilnehmer.	175	93	91	63	119	79	198	72	179	95
Summe.	1964	1861	1766	1608	1768	1671	1894	1730	1862	1768
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1922	1923		1924		1925		1926		1927

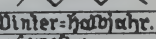
Studierende. a.	1584	1529	1630	
" b.	39	83	66	
Hörer.	29	29	56	
Gastteilnehmer	116	100	233	
Summe	1768	1741	1985	
Halbjahr.	W	S	W	S
Jahr.	1927	1928		1929

Anwesende Beurlaubte

Studierende. a. ▮ b. ▯

Hörer. a. ▮ b. ▯

Gastteilnehmer. I

Summe. 

S.=Sommer= W=Winter=Halbjahr.

W I 1918/19 Zwischensemester.

17.11.28. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. ep.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 1

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1

gibt an: Besucherzahlen je Halbjahr.

Vorkriegszeit.										
Studierende. a.	189	309	370	434	460	500	498	553	611	644
Hörer. a	57	62	96	96	102	83	72	70	79	66
Gastteilnehmer	353	151	408	152	409	210	413	220	500	140
Summe	599	522	874	662	971	793	983	843	1190	850
Halbjahr	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1904	1905		1906		1907		1908		1909
Studierende a.	647	624	628	634	630	590	625	665	676	675
Hörer. a.	80	66	76	38	61	49	61	72	58	56
Gastteilnehmer	607	102	631	103	612	79	731	76	585	89
Summe.	1334	792	1335	795	1303	718	1417	813	1319	820
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1909	1910		1911		1912		1913		1914
Kriegszeit.										
Studierende a.	116	98	67	78	78	71	95	133	170	
" b.	487	494	488	479	498	537	543	570	532	
Hörer. a.	5	6	8	5	3	5	11	10	13	
" b.	47	47	47	49	45	44	43	46	39	
Gastteilnehmer.	165	75	241	106	421	166	493	197	544	
Summe	820	720	851	717	1045	823	1185	956	1298	
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W I	
Jahr.	1914	1915		1916		1917		1918	1918/19	
Übergangszeit.										
Studierende a.	483	662	833	810	839	954	1089	1172		
" b.	277	225	190	179	23	31	20	27		
Hörer. a.	26	43	52	83	130	134	131	98		
Gastteilnehmer.	428	229	347	91	214	77	138	125		
Summe.	1214	1159	1422	1163	1206	1196	1378	1422		
Halbjahr.	W II	S	W	S	W	S	W	S		
Jahr.	1918/19	1919		1920		1921		1922		
Nachkriegszeit.										
Studierende. a.	1651	1638	1476	1335	1522	1414	1566	1488	1574	1515
" b.	17	33	124	159	63	131	73	131	70	125
Hörer a.	121	97	75	41	64	47	59	39	39	33
Gastteilnehmer.	175	93	91	63	119	79	198	72	179	95
Summe.	1964	1861	1766	1608	1768	1671	1894	1730	1862	1768
Halbjahr.	W	S	W	S	W	S	W	S	W	S
Jahr.	1922	1923		1924		1925		1926		1927
Studierende. a.	1584	1529	1630							
" b.	39	83	66							
Hörer.	29	29	56							
Gastteilnehmer	116	100	233							
Summe	1768	1741	1985							
Halbjahr.	W	S	W	S						
Jahr.	1927	1928		1929						

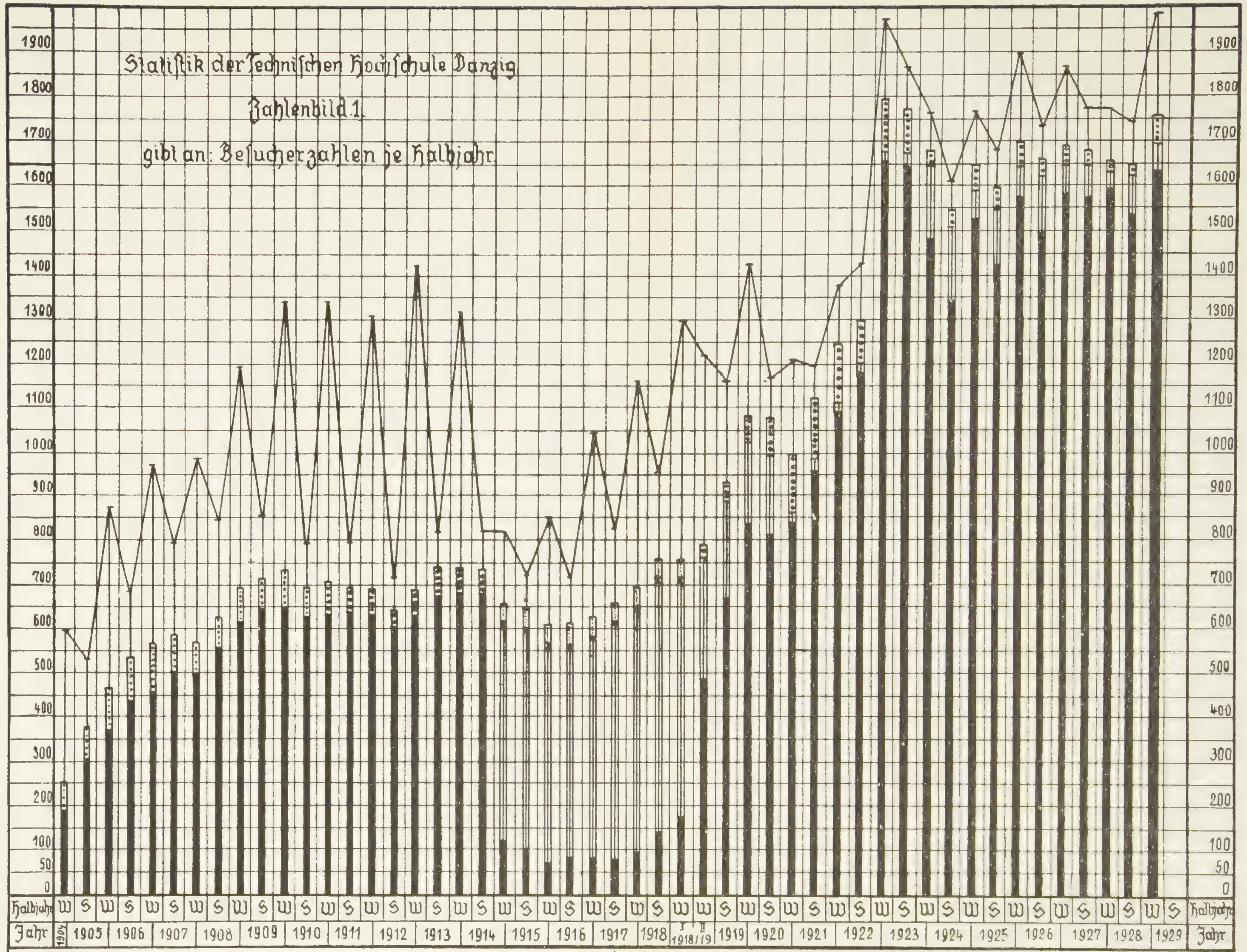
	Anwesende	Beurlaubte
Studierende.	a. ▌	b. ▯
Hörer.	a. ▯	b. ▯
Gastteilnehmer.	I	
Summe.	/\/\/\	

S. = Sommer- W = Winter-Halbjahr.

W II 1918/19 Zwischensemester.

17 11 28. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 1



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 1.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1a

gibt an: 1. Anzahl der Frauen.

2. %-Zahlen bezogen auf die Gesamtzahl der Studierenden.

	Halbjahr		Anzahl.	%
Vorkriegszeit.	1913	S	10	1,5
	1913/14	W	10	1,5
	1914	S	10	1,5
Kriegszeit.	1914/15	W	4	3,5
	1915	S	14	14,3
	1915/16	W	7	10,4
	1916	S	11	14,1
	1916/17	W	6	7,7
	1917	S	8	11,3
	1917/18	W	12	12,6
	1918	S	15	11,3
	1918/19 I	W	13	7,7
Übergangszeit.	1918/19 II	W	13	2,7
	1919	S	25	3,8
	1919/20	W	24	2,9
	1920	S	18	2,2
	1920/21	W	14	1,7
	1921	S	17	1,8
	1921/22	W	18	1,7
	1922	S	24	2,0
Nachkriegszeit.	1922/23	W	30	1,8
	1923	S	34	2,1
	1923/24	W	17	1,2
	1924	S	28	2,1
	1924/25	W	26	1,7
	1925	S	33	2,3
	1925/26	W	34	2,2
	1926	S	32	2,2
	1926/27	W	34	2,2
	1927	S	43	2,8
	1927/28	W	34	2,1
	1928	S	44	2,9
	1928/29	W	44	2,7

26.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel 1a

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1a

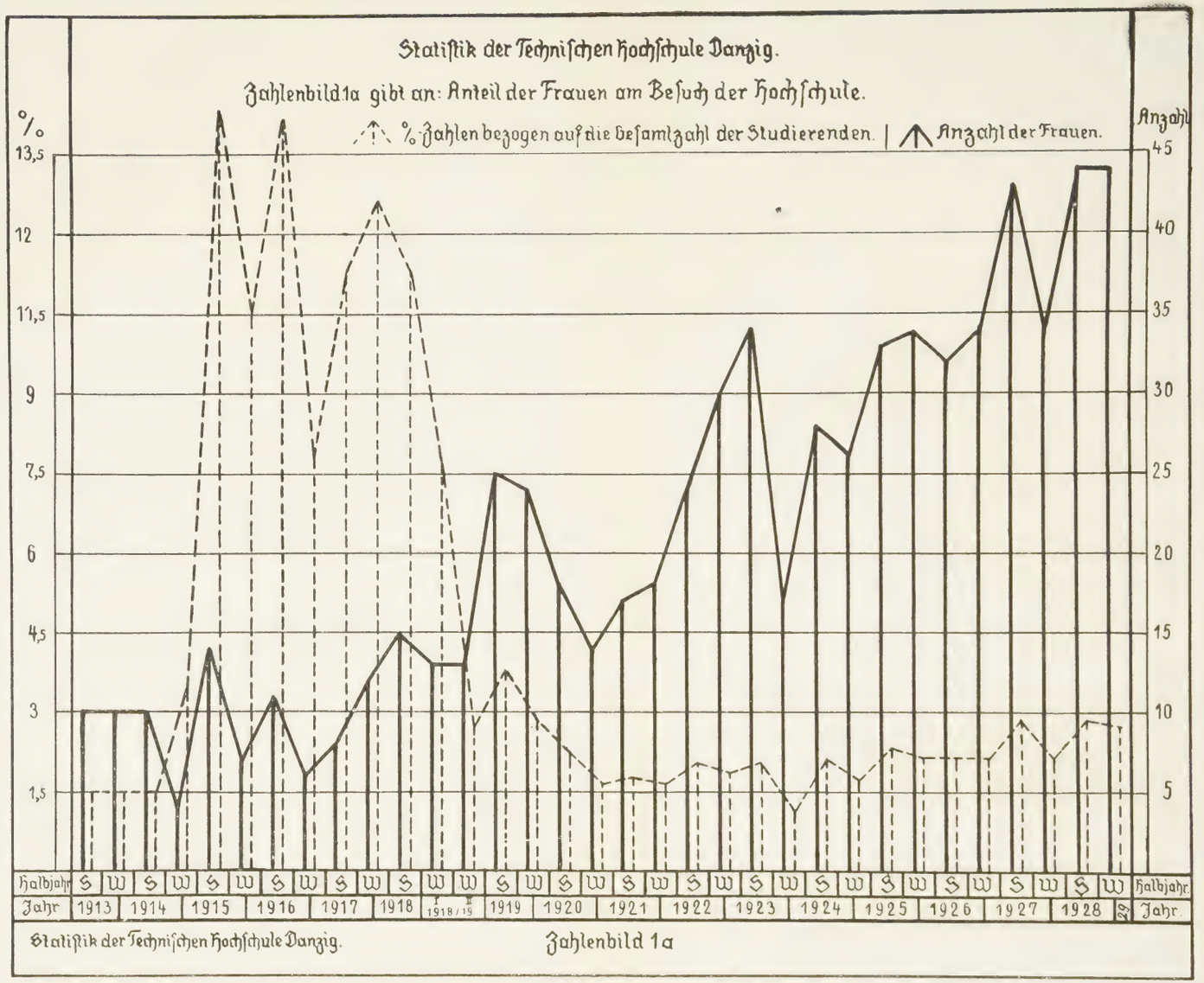
gibt an: 1. Anzahl der Frauen.

2. %-Zahlen bezogen auf die Gesamtzahl der Studierenden.

	Halbjahr		Anzahl.	%
Vorkriegszeit	1913	S	10	1,5
	1913/14	W	10	1,5
	1914	S	10	1,5
Kriegszeit	1914/15	W	4	3,5
	1915	S	14	14,3
	1915/16	W	7	10,4
	1916	S	11	14,1
	1916/17	W	6	7,7
	1917	S	8	11,3
	1917/18	W	12	12,6
	1918	S	15	11,3
	1918/19 I	W	13	7,7
Übergangszeit	1918/19 II	W	13	2,7
	1919	S	25	3,8
	1919/20	W	24	2,9
	1920	S	18	2,2
	1920/21	W	14	1,7
	1921	S	17	1,8
	1921/22	W	18	1,7
	1922	S	24	2,0
Nachkriegszeit	1922/23	W	30	1,8
	1923	S	34	2,1
	1923/24	W	17	1,2
	1924	S	28	2,1
	1924/25	W	26	1,7
	1925	S	33	2,3
	1925/26	W	34	2,2
	1926	S	32	2,2
	1926/27	W	34	2,2
	1927	S	43	2,8
	1927/28	W	34	2,1
	1928	S	44	2,9
	1928/29	W	44	2,7

26.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel 1a



Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1b gibt an: Verhältnis der Nationalitäten.

	Jahr	Hj.	Deutsche	Danziger	Andere	Summe
Vorkriegszeit	1904/05	W	234		12	246
	1905	S	350		21	371
	1905/06	W	414		52	466
	1906	S	468		62	530
	1906/07	W	509		53	562
	1907	S	533		50	583
	1907/08	W	539		31	570
	1908	S	594		29	623
	1908/09	W	653		37	690
	1909	S	681		29	710
	1909/10	W	693		34	727
	1910	S	662		28	690
	1910/11	W	674		30	704
	1911	S	666		26	692
	1911/12	W	662		29	691
	1912	S	612		27	639
	1912/13	W	654		32	686
	1913	S	706		31	737
	1913/14	W	687		37	724
	1914	S	694		37	731
Kriegszeit	1914/15	W	108		13	121
	1915	S	92		12	104
	1915/16	W	63		12	75
	1916	S	71		12	83
	1916/17	W	70		11	81
	1917	S	66		10	76
	1917/18	W	94		12	106
	1918	S	129		14	143
	1918/19 I	W	173		11	184
Danzig vom Reich getrennt. Nachkriegszeit.	1918/19 II	W	507		2	509
	1919	S	701		4	705
	1919/20	W	859		26	885
Übergangszeit	1920	S	646	170	77	893
	1920/21	W	657	192	120	969
	1921	S	661	233	194	1088
	1921/22	W	609	326	285	1220
	1922	S	555	360	355	1270
	1922/23	W	699	340	733	1772
	1923	S	668	350	717	1735
	1923/24	W	682	306	563	1551
	1924	S	668	221	487	1376
	1924/25	W	835	212	539	1586
	1925	S	810	190	461	1461
	1925/26	W	922	191	512	1625
	1926	S	876	211	440	1527
	1926/27	W	957	204	452	1613
	1927	S	908	223	417	1548
	1927/28	W	983	196	434	1613
	1928	S	940	231	387	1558
	1928/29	W	1061	234	391	1686
	1929	S				

28.11.28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel 1b

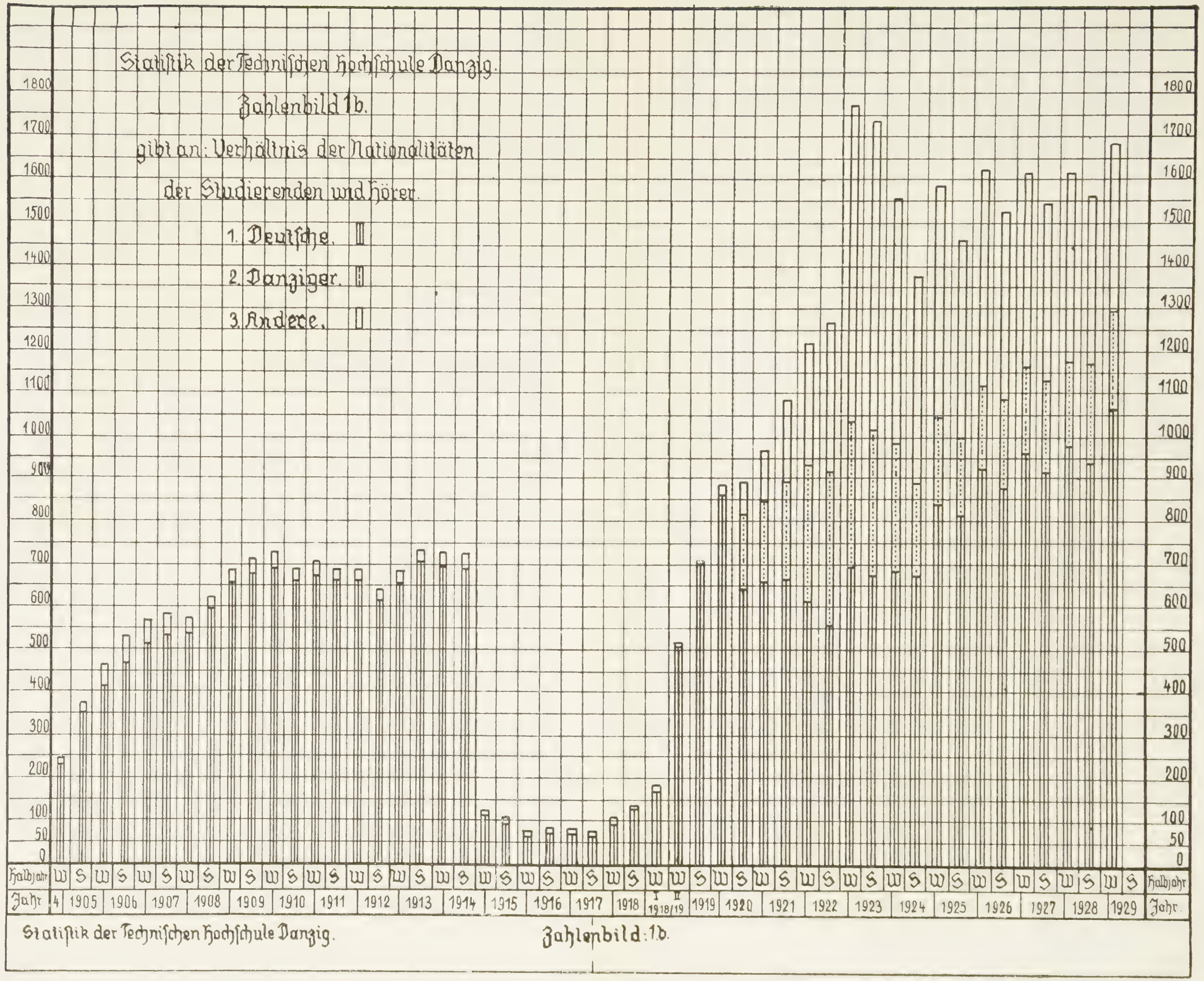
Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1b gibt an: Verhältnis der Nationalitäten.

	Jahr	Hj.	Deutsche	Danziger	Andere	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	W	234		12	246
	1905	S	350		21	371
	1905/06	W	414		52	466
	1906	S	468		62	530
	1906/07	W	509		53	562
	1907	S	533		50	583
	1907/08	W	539		31	570
	1908	S	594		29	623
	1908/09	W	653		37	690
	1909	S	681		29	710
	1909/10	W	693		34	727
	1910	S	662		28	690
	1910/11	W	674		30	704
	1911	S	666		26	692
	1911/12	W	662		29	691
	1912	S	612		27	639
	1912/13	W	654		32	686
	1913	S	706		31	737
	1913/14	W	687		37	724
	1914	S	694		37	731
Kriegszeit.	1914/15	W	108		13	121
	1915	S	92		12	104
	1915/16	W	63		12	75
	1916	S	71		12	83
	1916/17	W	70		11	81
	1917	S	66		10	76
	1917/18	W	94		12	106
	1918	S	129		14	143
	1918/19 I	W	173		11	184
Übergangszeit.	1918/19 II	W	507		2	509
	1919	S	701		4	705
	1919/20	W	859		26	885
Danzig vom Reich getrennt.	1920	S	646	170	77	893
	1920/21	W	657	192	120	969
	1921	S	661	233	194	1088
	1921/22	W	609	326	285	1220
	1922	S	555	360	355	1270
Nachkriegszeit.	1922/23	W	699	340	733	1772
	1923	S	668	350	717	1735
	1923/24	W	682	306	563	1551
	1924	S	668	221	487	1376
	1924/25	W	835	212	539	1586
	1925	S	810	190	461	1461
	1925/26	W	922	191	512	1625
	1926	S	876	211	440	1527
	1926/27	W	957	204	452	1613
	1927	S	908	223	417	1548
	1927/28	W	983	196	434	1613
	1928	S	940	231	387	1558
	1928/29	W	1061	234	391	1686
	1929	S				

28.11.28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 1.b



Zahlenbild 1 gibt an: Vergleich der Besucherzahlen in Danzig, Hannover u. Stuttgart.

Danziger Einteilung			Ia+b	*Ic	IIa.	IIb.	IIIa.	IIIb.	IIIc	**	Summe	Zeichenerklärung
Hannover.	1920/21	W	101	317	228	489	1234	567			2936	Ia+b.
	1921	S	140	295	207	439	1213	545			2839	Abt. für Allgemeine
	1921/22	W	170	298	192	454	1282	607			3003	Wissenschaften,
	1922	S	168	294	190	418	1191	547			2808	Mathematik, Physik.
	1922/23	W	197	300	181	398	1280	600			2956	
	1923	S	189	295	169	348	1238	563			2802	* Ic.
	1923/24	W	205	256	127	341	1293	560			2782	Abt. für Chemie.
	1924	S	65	242	112	269	1001	495			2184	
	1924/25	W	72	241	116	266	1086	568		Hörer	2349	IIa.
	1925	S	65	*222	123	238	963	501		**82	2194	Abt. für Architektur.
	1925/26	W	71	183	151	*255	1053	536		82	2331	
	1926	S	83	165	137	259	870	474	8	68	2064	IIb.
	1926/27	W	86	159	147	272	889	494		77	2124	Abt. f. Bauingenieurwesen
	1927	S	85	136	128	278	745	416	19	56	1863	
	1927/28	W	74	124	156	314	775	459	32	61	1995	IIa.
	1928	S	87	120	154	302	712	397		55	1827	Abt. f. Maschinenbau.
	1928/29	W										
Danzig.	1920/21	W	155	92	93	165	238	128	98		969	IIb.
	1921	S	177	111	88	185	279	151	97		1088	Abt. f. Elektrotechnik.
	1921/22	W	178	125	83	193	324	185	132		1220	
	1922	S	176	119	94	197	371	184	129		1270	IIc
	1922/23	W	178	140	122	277	571	318	166		1772	Abt. f. Schiffstechnik,
	1923	S	203	125	116	261	552	318	160		1735	Schiffsmaschinenbau
	1923/24	W	162	109	88	244	510	308	130		1551	u. Flugtechnik.
	1924	S	116	91	97	213	472	270	117		1376	
	1924/25	W	100	* 99	109	209	580	342	147		1586	
	1925	S	97	*104	106	196	519	309	130		1461	* Ic
	1925/26	W	92	*117	115	235	565	349	152		1625	in Danzig einschl.
	1926	S	108	*110	117	227	519	306	140		1527	d. Landwirte;
	1926/27	W	115	*113	126	240	544	311	184		1613	in Hannover auch
	1927	S	134	*134	125	223	479	302	151		1548	Bergbau und
	1927/28	W	126	*127	124	233	493	311	199		1613	Hüttenkunde;
	1928	S	144	*145	124	242	436	277	190		1558	in Stuttgart auch
	1928/29	W	142	*153	143	285	461	297	205		1688	Pharmazie und
Stuttgart.	1920/21	W	201	322	219	343	642	233			1960	Hüttenkunde.
	1921	S	197	346	201	307	619	255			1925	
	1921/22	W	177	354	207	336	715	303			2092	
	1922	S	201	365	196	273	697	299			2031	** Hörer
	1922/23	W	276	372	230	328	741	364			2311	in Hannover
	1923	S	242	403	238	283	710	344			2220	seit S.J. 1925 nicht
	1923/24	W	213	* 434	216	286	718	333			2200	mehr auf die Abt.
	1924	S	150	* 369	158	213	619	279			1788	verteilt angegeben.
	1924/25	W	161	* 378	213	215	740	293			2000	
	1925	S	139	* 350	182	198	675	276			1820	Angaben für
	1925/26	W	122	* 311	258	215	740	314			1960	Hannover und
	1926	S	135	* 281	236	209	652	285			1798	Stuttgart nach
	1926/27	W	159	* 273	284	202	681	320			1919	den Jahrgängen;
	1927	S	174	* 252	242	205	619	279			1771	1921 – 1928
	1927/28	W	196	* 239	304	249	580	271	1		1840	des statistischen
	1928	S	153	* 233	295	236	530	231	1		1679	Jahrbuchs für das
	1928/29	W										Deutsche Reich.

Danziger Zahlen nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung.

25 3.29 Ep.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlentafel 1c

Zahlenbild 1c gibt an: Vergleich der Besucherzahlen in Danzig, Hannover u. Stuttgart.

Danziger Einteilung.			Ia+b	Ic	IIa.	IIb.	IIIa.	IIIb.	IIIc	++	Summe	Zeichenerklärung
Hannover.	1920/21	W	101	317	228	489	1234	567			2936	Ia+b.
	1921	S	140	295	207	439	1213	545			2839	Abt. für Allgemeine
	1921/22	W	170	298	192	454	1282	607			3003	Wissenschaften,
	1922	S	168	294	190	418	1181	547			2808	Mathematik, Physik.
	1922/23	W	197	300	181	398	1280	600			2956	
	1923	S	189	295	169	348	1238	563			2802	* Ic.
	1923/24	W	205	256	127	341	1293	560			2782	Abt. für Chemie.
	1924	S	65	242	112	269	1001	495			2184	
	1924/25	W	72	241	116	266	1086	568		Hörer	2349	IIa.
	1925	S	65	*222	123	238	963	501		++82	2194	Abt. für Architektur.
	1925/26	W	71	183	151	-255	1053	536		82	2331	
	1926	S	83	165	137	259	870	474	8	68	2064	IIb.
	1926/27	W	86	159	147	272	889	494		77	2124	Abt. f. Bauingenieurwesen
	1927	S	85	136	128	278	745	416	19	56	1863	
	1927/28	W	74	124	156	314	775	459	32	61	1995	IIIa.
	1928	S	87	120	154	302	712	397		55	1827	Abt. f. Maschinenbau.
	1928/29	W										
Danzig.	1920/21	W	155	92	93	165	238	128	98		969	IIIb.
	1921	S	177	111	88	185	279	151	97		1088	Abt. f. Elektrotechnik.
	1921/22	W	178	125	83	193	324	185	132		1220	
	1922	S	176	119	94	197	371	184	129		1270	IIIc
	1922/23	W	178	140	122	277	571	318	166		1772	Abt. f. Schiffstechnik,
	1923	S	203	125	116	261	552	318	160		1735	Schiffsmaschinenbau
	1923/24	W	162	109	88	244	510	308	130		1551	u. Flugtechnik.
	1924	S	116	91	97	213	472	270	117		1376	
	1924/25	W	100	* 99	109	209	580	342	147		1586	
	1925	S	97	*104	106	196	519	309	130		1461	* Ic
	1925/26	W	92	*117	115	235	565	349	152		1625	in Danzig einschl.
	1926	S	108	*110	117	227	519	306	140		1527	d. Landwirte;
	1926/27	W	115	*113	126	240	544	311	164		1613	in Hannover auch
	1927	S	134	*134	125	223	479	302	151		1548	Bergbau und
	1927/28	W	126	*127	124	233	493	311	199		1613	Hüttenkunde;
	1928	S	144	*145	124	242	436	277	190		1558	in Stuttgart auch
	1928/29	W	142	*153	143	285	461	297	205		1686	Pharmazie und
Stuttgart.	1920/21	W	201	322	219	343	642	233			1960	Hüttenkunde.
	1921	S	197	346	201	307	619	255			1925	
	1921/22	W	177	354	207	336	715	303			2092	
	1922	S	201	365	196	273	697	289			2031	++ Hörer
	1922/23	W	276	372	230	328	741	364			2311	in Hannover
	1923	S	242	403	238	283	710	344			2220	seit S.H. 1925 nicht
	1923/24	W	213	*434	216	286	718	333			2200	mehr auf die Abt.
	1924	S	150	*369	158	213	619	279			1788	verteilt angegeben.
	1924/25	W	161	*378	213	215	740	293			2000	
	1925	S	139	*350	182	198	675	276			1820	Angaben für
	1925/26	W	122	*311	258	215	740	314			1960	Hannover und
	1926	S	135	*281	236	209	652	285			1798	Stuttgart nach
	1926/27	W	159	*273	284	202	681	320			1919	den Jahrgängen:
	1927	S	174	*252	242	205	619	279			1771	1921 – 1928
	1927/28	W	196	*239	304	249	580	271	1		1840	des statistischen
	1928	S	153	*233	295	236	530	231	1		1679	Jahrbuchs für das
	1928/29	W										Deutsche Reich.

Danziger Zahlen nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung.

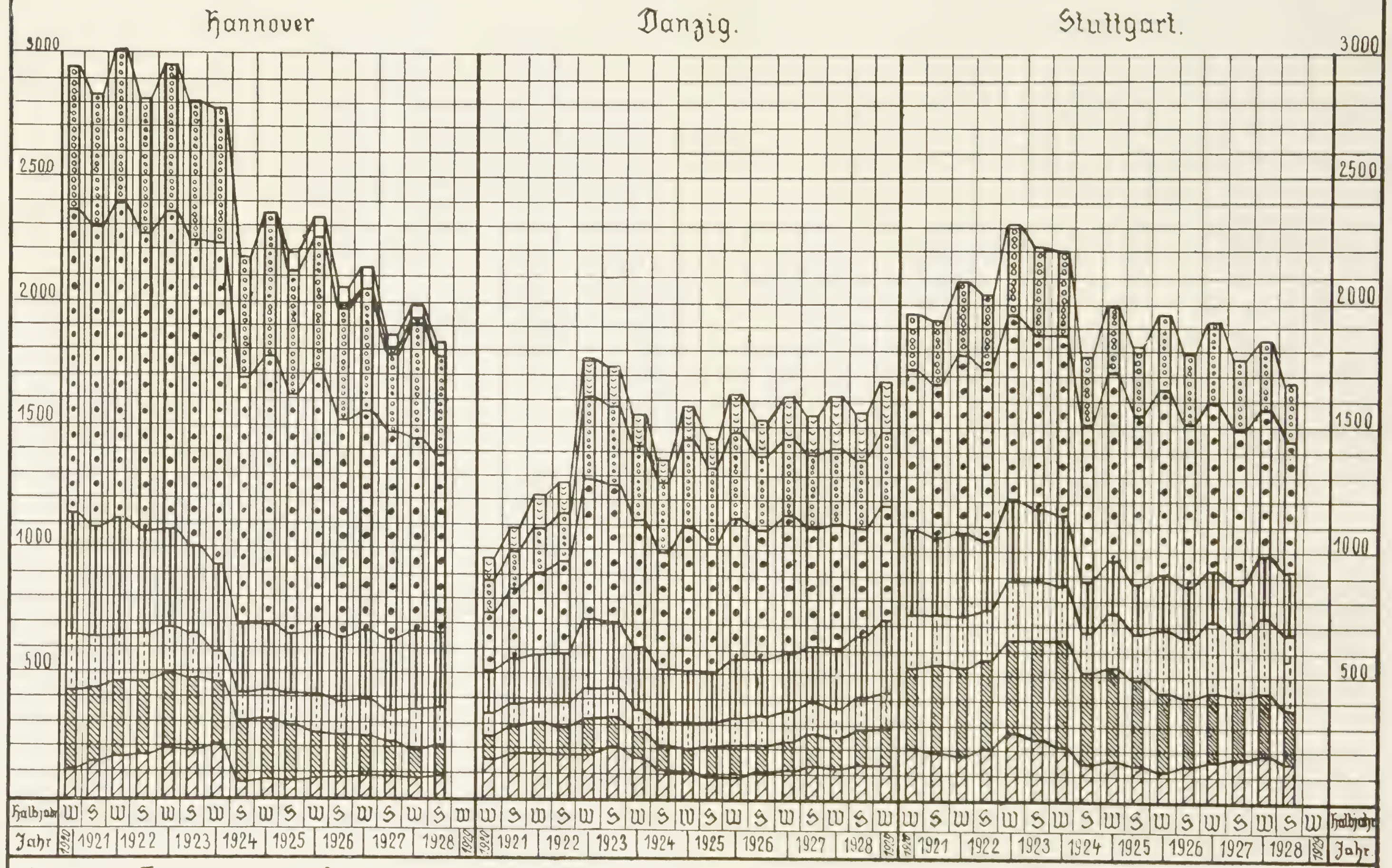
25 3.29 — E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlentafel: 1c

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 1c.

gibt an: Vergleich der Technischen Hochschulen Hannover, Danzig u. Stuttgart.



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 1c.

Zahlenbild 2 gibt an: Verteilung der Studierenden und Hörer auf d. Abteilungen.

	Alte Bezeichnung.		VI		V	I	II.	III	IIIe.	IV.	Summe	← Abteilungen.
Vorkriegszeit.	1904/05	W	23		25	33	66	42	17	40	246	
	1905	S	24		25	65	115	59	20	63	371	
	1905/06	W	24		23	80	125	82	30	102	466	
	1906	S	29		28	90	183	92	25	103	530	Darstellung:
	1906/07	W	25		29	98	176	90	26	118	562	
	1907	S	23		26	109	200	89	23	113	583	VI. Allgemeine
	1907/08	W	19		29	97	197	95	23	110	570	Wissenschaften.
	1908	S	18		36	110	244	83	27	105	623	
	1908/09	W	23		41	129	256	96	33	112	690	Ia. Abt. f. Geistes-
	1909	S	37		46	135	276	94	27	95	710	Wissenschaften
	1909/10	W	43		57	144	260	102	27	94	727	
	1910	S	39		51	143	260	91	24	82	690	Ib. Abt. f. Mathematik
	1910/11	W	46		54	139	242	109	29	85	704	u. Physik.
	1911	S	47		59	137	238	104	30	77	692	
	1911/12	W	48		45	139	243	110	27	79	691	
	1912	S	39		49	117	235	103	27	69	639	V. Abt. f. Chemie.
	1912/13	W	48		52	124	238	124	34	68	686	Ic " " " *)
	1913	S	59		55	131	258	134	37	63	737	
	1913/14	W	38		51	127	263	154	37	64	734	
	1914	S	44		51	124	261	152	38	61	731	
Kriegszeit	1914/15	W	13		12	22	33	32		9	121	I. Abt. f. Architektur.
	1915	S	22		?	15	29	23		8	104	Ia " " " "
	1915/16	W	15		2	14	17	19		8	75	
	1916	S	19		5	13	20	19		7	83	
	1916/17	W	12		6	11	23	23		6	81	II. Abt. f. Bauin-
	1917	S	17		9	9	18	18		5	78	IIb. genieurwesen.
	1917/18	W	29		?	9	15	34		12	106	
	1918	S	32		12	15	29	43		12	143	
	1918/18 I	W	26		17	20	43	57		20	183	III Abt. f. Maschinen
Übergangszeit.	1918/19 II	W	69		60	57	121	111	46	45	509	IIIa " " " bau
	1919	S	88		88	83	156	161	71	58	705	
	1919/20	W	125		91	101	170	230	96	72	885	
	1920	S	122		75	107	178	241	101	69	893	IIIe Abt. f.
	1920/21	W	153		92	93	165	238	128	98	969	IIIb. Elektrotechnik
	1921	S	177		111	88	185	279	151	97	1088	
	1921/22	W	178		125	83	193	324	185	132	1220	
	1922	S	176		119	94	197	371	184	129	1270	IV. Abt. f. Schiff-
Nachkriegszeit	1922/23	W	163	15	140	122	277	571	318	166	1772	u. Schiffsmaschi-
	1923	S	173	30	125	116	261	552	318	180	1735	nenbau
	1923/24	W	130	32	109	88	244	510	308	130	1551	IIIc Abt. f. Schiffs-
	1924	S	69	47	91	97	213	472	270	117	1376	technik u. seit
	1924/25	W	49	51	99	109	209	580	342	147	1586	S26 Flugtechnik
	1925	S	38	59	104	106	196	519	309	130	1461	
	1925/26	W	40	52	117	115	235	565	349	152	1625	
	1926	S	32	76	110	117	227	519	306	140	1527	
	1926/27	W	37	78	113	126	240	544	311	164	1613	
	1927	S	24	110	134	125	223	479	302	151	1548	*) Ic darin seit
	1927/28	W	30	96	127	124	233	493	311	199	1613	W 24/25 Landwirte
	1928	S	47	97	145	124	242	436	277	190	1558	
	1928/29	W	48	94	153	141	285	461	297	205	1686	
	Neue Bezeichnung.		Ia.	Ib.	Ic.	IIa	IIb	IIIa.	IIIb.	IIIc	Summe	← Fakultäten

22 II 28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlentafel: 2

Zahlenbild 2. gibt an: Verteilung der Studierenden und Hörer auf d. Abteilungen.

Alte Bezeichnung			VI		V	I	II.	III	IIIe.	IV.	Summe ← Abteilungen.
Vorkriegszeit.	1904/05	W	23		25	33	66	42	17	40	246
	1905	S	24		25	65	115	59	20	63	371
	1905/06	W	24		23	80	125	82	30	102	466
	1906	S	29		28	90	183	92	25	103	530
	1906/07	W	25		29	98	176	90	26	118	562
	1907	S	23		26	109	200	89	23	113	583
	1907/08	W	19		29	97	197	95	23	110	370
	1908	S	18		36	110	244	83	27	105	623
	1908/09	W	23		41	129	256	96	33	112	690
	1909	S	37		46	135	276	94	27	95	710
	1909/10	W	43		57	144	260	102	27	94	727
	1910	S	39		51	143	260	91	24	82	690
	1910/11	W	46		54	139	242	109	29	85	704
	1911	S	47		59	137	238	104	30	77	692
	1911/12	W	48		45	139	243	110	27	79	691
	1912	S	39		49	117	235	103	27	69	639
	1912/13	W	46		52	124	238	124	34	68	686
	1913	S	59		55	131	258	134	37	63	737
	1913/14	W	38		51	127	263	154	37	64	734
	1914	S	44		51	124	261	152	38	61	731
Kriegszeit	1914/15	W	13		12	22	33	32		9	121
	1915	S	22		7.	15	29	23		8	104
	1915/16	W	15		2	14	17	19		8	75
	1916	S	19		5	13	20	19		7	83
	1916/17	W	12		6	11	23	23		6	81
	1917	S	17		9	9	18	18		5	78
	1917/18	W	29		7	9	15	34		12	106
	1918	S	32		12	15	29	43		12	143
	1918/18 I	W	26		17	20	43	57		20	183
Übergangszeit.	1918/19 II	W	69		60	57	121	111	46	45	509
	1919	S	88		88	83	156	161	71	58	705
	1919/20	W	125		91	101	170	230	96	72	885
	1920	S	122		75	107	178	241	101	69	893
	1920/21	W	155		92	93	165	238	128	98	969
	1921	S	177		111	88	185	279	151	97	1088
	1921/22	W	178		125	83	193	324	185	132	1220
	1922	S	176		119	94	197	371	184	129	1270
Nachkriegszeit	1922/23	W	163	15	140	122	277	571	318	166	1772
	1923	S	173	30	125	116	261	552	318	180	1735
	1923/24	W	130	32	109	88	244	510	308	130	1551
	1924	S	69	47	91	97	213	472	270	117	1376
	1924/25	W	49	51	99	109	209	580	342	147	1586
	1925	S	38	59	104	106	196	519	309	130	1461
	1925/26	W	40	52	117	115	235	565	349	152	1625
	1926	S	32	76	110	117	227	519	306	140	1527
	1926/27	W	37	78	113	126	240	544	311	164	1613
	1927	S	24	110	134	125	223	479	302	151	1548
	1927/28	W	30	96	127	124	233	493	311	199	1613
	1928	S	47	97	145	124	242	436	277	190	1558
	1928/29	W	48	94	153	141	285	461	297	205	1686
Neue Bezeichnung			Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	Summe ← Fakultäten

Darstellung:

VI. Allgemeine Wissenschaften.

Ia. Abt. f. Geistes-Wissenschaften

Ib. Abt. f. Mathematik u. Physik.

V. Abt. f. Chemie.
Ic " " " +)

I. Abt. f. Architektur.
IIa " " "

II. Abt. f. Bauingenieurwesen.
IIb.

III Abt. f. Maschinenbau
IIIa " " " bau

IIIe. Abt. f.
IIIb. Elektrotechnik

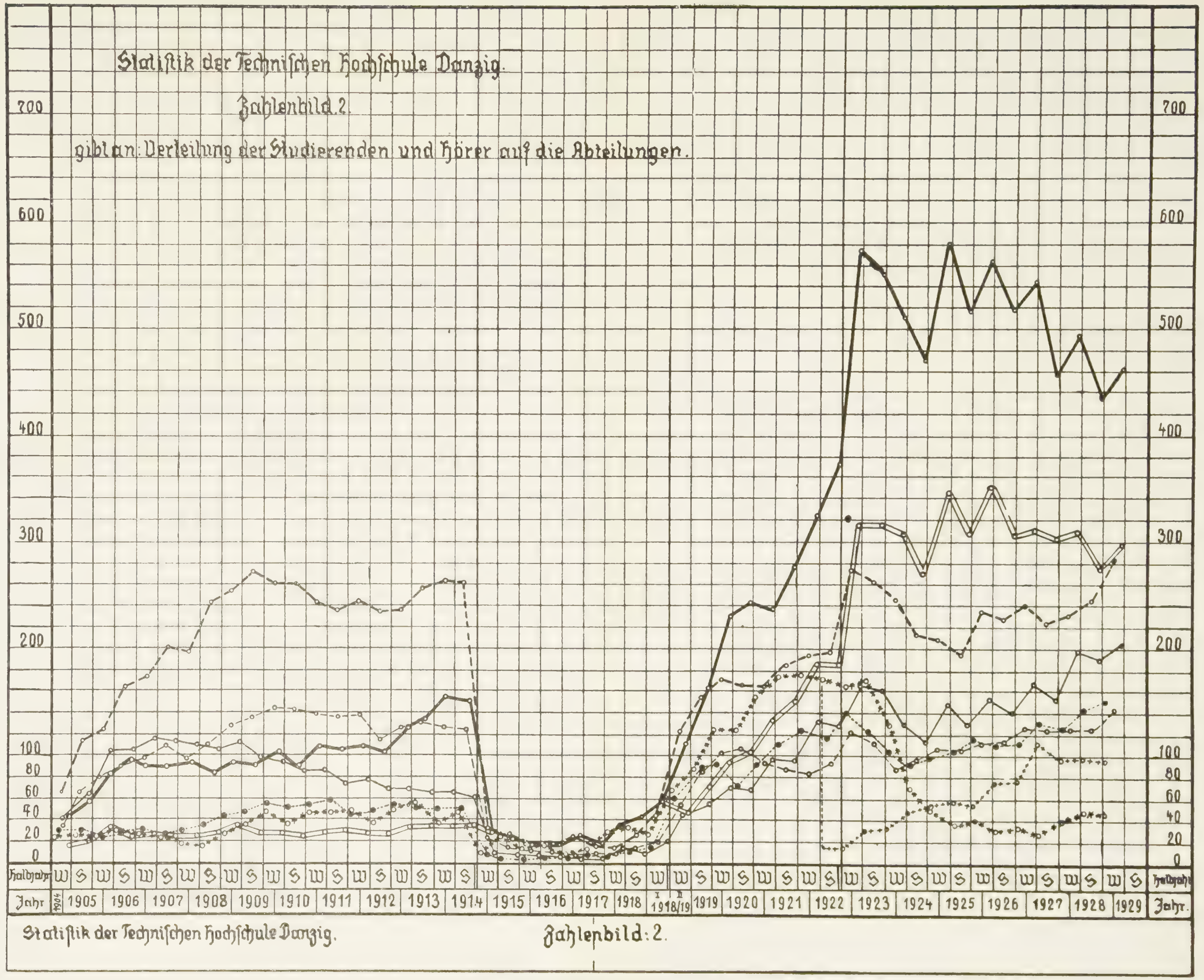
IV. Abt. f. Schiff- u. Schiffmaschinenbau

IIIc. Abt. f. Schiffstechnik u. seit S 28 Flugtechnik.

+) Ic darin seit W 24/25 Landwirte

22 11 28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E. P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlentafel: 2



Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlenbild 3a.

gibt an: Diplomvorprüfungen.

	Alte Bezeichnung		Abi	VI	V	I	II	III	IIIe	IV	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	W									
	1905	S				2		4			6
	1905/06	W				3	3	1	3		10
	1906	S				3	6	1	6		16
	1906/07	W				4	12	5	8		29
	1907	S				12	8	3	4		27
	1907/08	W			3	8	21	5	10		47
	1908	S				8	20	3	4		33
	1908/09	W			3	4	18	6	8		39
	1909	S				10	9	10	6		35
	1909/10	W			4	14	20	?	6		51
	1910	S			4	9	21	5	6		45
	1910/11	W			5	5	18	5	2		35
	1911	S			1	13	20	14	8		56
	1911/12	W			4	4	16	7	7		38
	1912	S			3	10	12	7	8		40
	1912/13	W			4	7	11	8	10		40
	1913	S			1	6	15	6	7		35
	1913/14	W			3	18	12	7	5		45
	1914	S			5	12	30	16	12		75
Kriegszeit.	1914/15	W				1	2	8	1		12
	1915	S				1	5	2	2		10
	1915/16	W					3	2	1		6
	1916	S				2	1				3
	1916/17	W				1	6	1	1		9
	1917	S						7			7
	1917/18	W				2	1	3	1		7
	1918	S			2	4	1	1	1		9
	1918/19	W			1		5	3	2		11
Übergangszeit.	1919	S			7	7	18	1	2		35
	1919/20	W			1	10	8	11	9		39
	1920	S			15	7	10	26	9		67
	1920/21	W			15	15	16	14	10		70
	1921	S			10	9	13	56	9		97
	1921/22	W			12	12	13	5	10		52
	1922	S				7	12	5	6		30
Nachkriegszeit.	1922/23	W	Fak		15	3	14	39	9		80
	1923	S			13	6	18	39	10		86
	1923/24	W				4	12	26	8		50
	1924	S			9	8	9	38	12		76
	1924/25	W		2	11	6	25	25	15		84
	1925	S		1	12	7	30	55	11		116
	1925/26	W		1	5	14	17	50	7		94
	1926	S		5	12	11	17	76	13		134
	1926/27	W		5	13	8	22	79	9		136
	1927	S		4	10	15	24	90	11		154
	1927/28	W		4	11	13	20	53	10		111
	1928	S		2	8	20	26	49	13		116
	1928/29	W		6	11	15	20	53	14		119
	1929	S									

Neue Bezeichnung.	Fak	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	Summe
26.11.28	Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung.									E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 3a

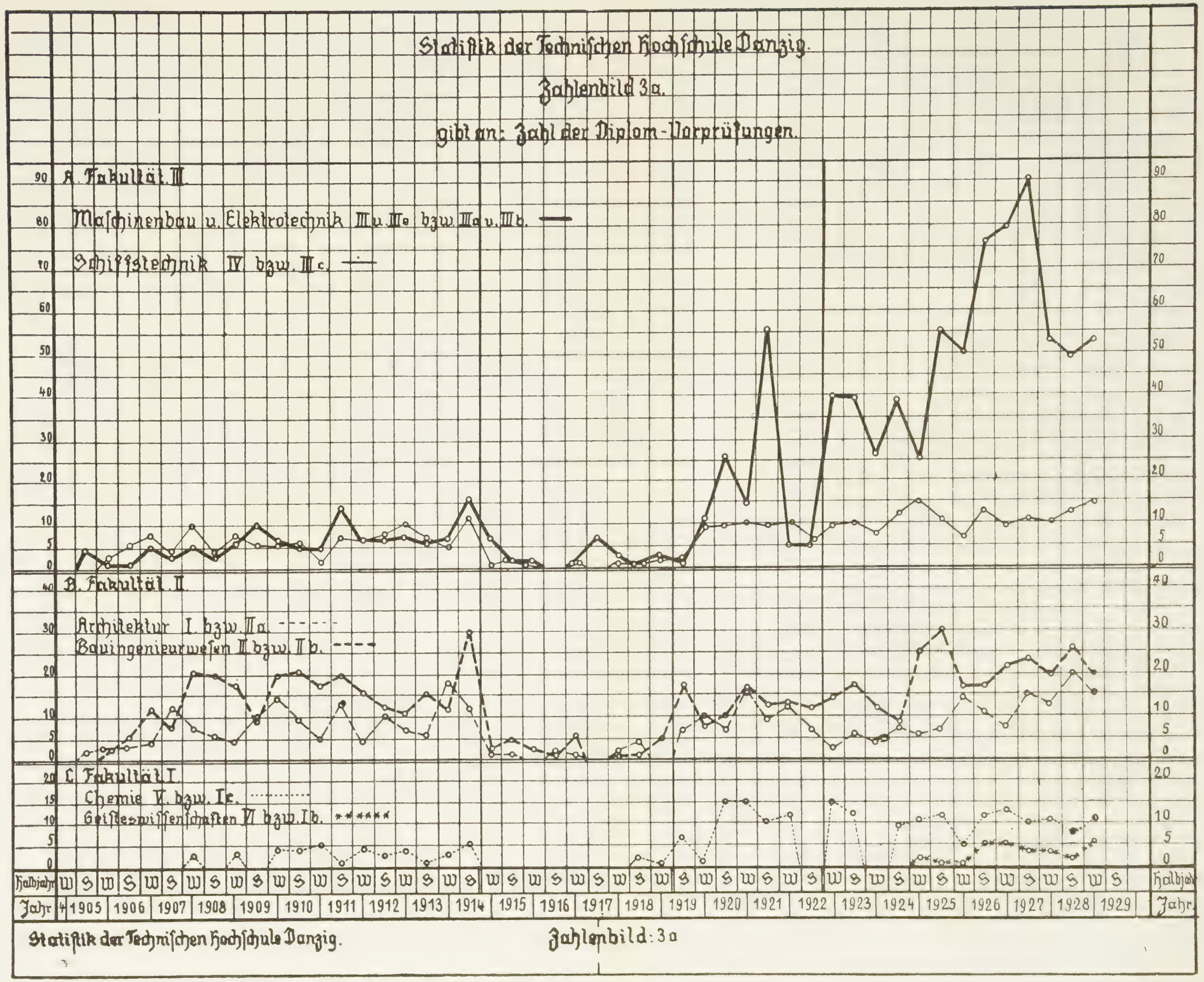
Statistik der Technischen Hochschule Danzig Zahlenbild 3a.

gibt an: Diplomvorprüfungen.

Alte Bezeichnung			Abl	VI		V	I	II	III IIIe	IV	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	W									
	1905	S					2		4		6
	1905/06	W					3	3	1	3	10
	1906	S					3	6	1	6	16
	1906/07	W					4	12	5	8	29
	1907	S					12	8	3	4	27
	1907/08	W				3	8	21	5	10	47
	1908	S					6	20	3	4	33
	1908/09	W				3	4	18	6	8	39
	1909	S					10	9	10	6	35
	1909/10	W				4	14	20	7	6	51
	1910	S				4	9	21	5	6	45
	1910/11	W				5	5	18	5	2	35
	1911	S				1	13	20	14	8	56
	1911/12	W				4	4	16	7	7	38
	1912	S				3	10	12	7	8	40
	1912/13	W				4	7	11	8	10	40
	1913	S				1	6	15	6	7	35
	1913/14	W				3	18	12	7	5	45
	1914	S				5	12	30	16	12	75
Kriegszeit.	1914/15	W					1	2	8	1	12
	1915	S					1	5	2	2	10
	1915/16	W						3	2	1	6
	1916	S					2	1			3
	1916/17	W					1	6	1	1	9
	1917	S							7		7
	1917/18	W					2	1	3	1	7
	1918	S				2	4	1	1	1	9
	1918/19	W				1		5	3	2	11
Übergangszeit.	1919	S				7	7	18	1	2	35
	1919/20	W				1	10	8	11	9	39
	1920	S				15	7	10	26	9	67
	1920/21	W				15	15	16	14	10	70
	1921	S				10	9	13	56	9	97
	1921/22	W				12	12	13	5	10	52
	1922	S					7	12	5	6	30
Nachkriegszeit.	1922/23	W	Fak			15	3	14	39	9	80
	1923	S				13	6	18	39	10	86
	1923/24	W					4	12	26	8	50
	1924	S				9	8	9	38	12	76
	1924/25	W			2	11	6	25	25	15	84
	1925	S			1	12	7	30	55	11	116
	1925/26	W			1	5	14	17	50	7	94
	1926	S			5	12	11	17	76	13	134
	1926/27	W			5	13	8	22	79	9	136
	1927	S			4	10	15	24	90	11	154
	1927/28	W			4	11	13	20	53	10	111
	1928	S			2	8	20	26	49	13	116
	1928/29	W			6	11	15	20	53	14	119
	1929	S									
Neue Bezeichnung.			Fak	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa IIIb	IIIc	Summe

26.11.28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 3a



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild 3b.

gibt an: Diplom-Hauptprüfungen. | Doktor-Promotionen.

Alte Bezeichnung.			Diplom-Hauptprüfungen.									Doktor-Promotionen.							
			VI	VI	V	I	II	III	IIIc	IV	Summe	VI.	VI	V	I	II	III	IV	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	W																	
	1905	S																	
	1905/06	W				3	5	6		2	16								
	1906	S				1	1	6		1	9						1		1
	1906/07	W			1	8	7	2		2	20						1		1
	1907	S				3	12	6		2	23			1			1		2
	1907/08	W			1	14	13	7		2	37				1		1		2
	1908	S				4	4	2		3	13								
	1908/09	W			3	5	17	2		9	36				1		2		3
	1909	S			1	5	9	7		6	28				2		3		5
	1909/10	W			3	12	13	3		10	43			1	2	1	1	1	6
	1910	S				6	12	7		2	27			1	2		1		4
	1910/11	W			6	13	29	3		7	58			2				1	3
	1911	S			1	12	12	8		4	37			4			1	1	6
	1911/12	W			5	16	18	3		3	45			1			2		3
	1912	S				13	8	5		6	32			2			1		3
	1912/13	W				18	15	8		5	46			1	3		2		6
	1913	S			7	5	11	9		8	40			5		1	1		7
	1913/14	W			4	19	18	5		7	53			1	2		2		5
	1914	S			3	16	45	9		4	77			2	1	1	1		5
Kriegszeit.	1914/15	W			1	4	3	3		1	12			1		1			2
	1915	S			1	4	5	2		2	14				1				1
	1915/16	W			1	4	9	6			20			1			2		3
	1916	S				1	6	2		4	13			2		1	1		4
	1916/17	W				4	7	1			12			2	1			1	4
	1917	S				1	6	1			8			2		2		1	5
	1917/18	W				2	1				3						1		1
	1918	S			1	3	3	2			9			1		3			4
	1918/19	W					4	4			8					1			1
Übergangszeit.	1919	S			3		9	4			16			1	1	3	1	1	7
	1919/20	W			6	8	11	13		2	40					3	4	1	8
	1920	S			1	5	13	5		5	29			1			1	1	3
	1920/21	W			3	10	6	15		3	37			2	1	2			5
	1921	S			8	8	15	9		7	47			3			1	2	6
	1921/22	W			9	6	4	13		4	36			1		2	1		4
	1922	S			11	3	6	11		4	41			6	1	1	1		9
Nachkriegszeit.	1922/23	W			10	9	10	11	11	9	60			3	2		3	1	9
	1923	S			9	9	14	16	3	4	55			10	1			1	12
	1923/24	W			11	15	22	14	11	9	82		1	6		3	4		14
	1924	S			4	7	24	19	12	9	75			11	1		4		16
	1924/25	W		1	7	3	13	36	15	5	80	1	1	6		3		1	12
	1925	S		1	3	6	9	13	10	6	48			2	1				3
	1925/26	W		1	9	6	10	21	8	10	65		1	1	2	2	1	2	9
	1926	S		1	11	11	9	8	6	6	52	1		4			3	2	10
	1926/27	W	1		5	4	29	33	15	3	90		1	5	1	1	1		9
	1927	S			6	7	18	31	15	9	86		1	3				1	5
	1927/28	W		1	15	11	17	25	24	3	96			3	1	2	3	1	10
	1928	S		1	10	18	11	27	13	9	89	1	1	5		1			8
	1928/29	W		1	14	8	21	39	17	13	113	1		2	1	4	1		9
	Summe		1	7	200	350	564	484	160	210	1976	4	6	105	29	38	54	19	225

Neue Bezeichnung.	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	Summe	Ia.	Ib.	Ic	IIa.	IIb	IIIa.	IIIc.	Summe
24.XI.1928	Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung.																S.P.

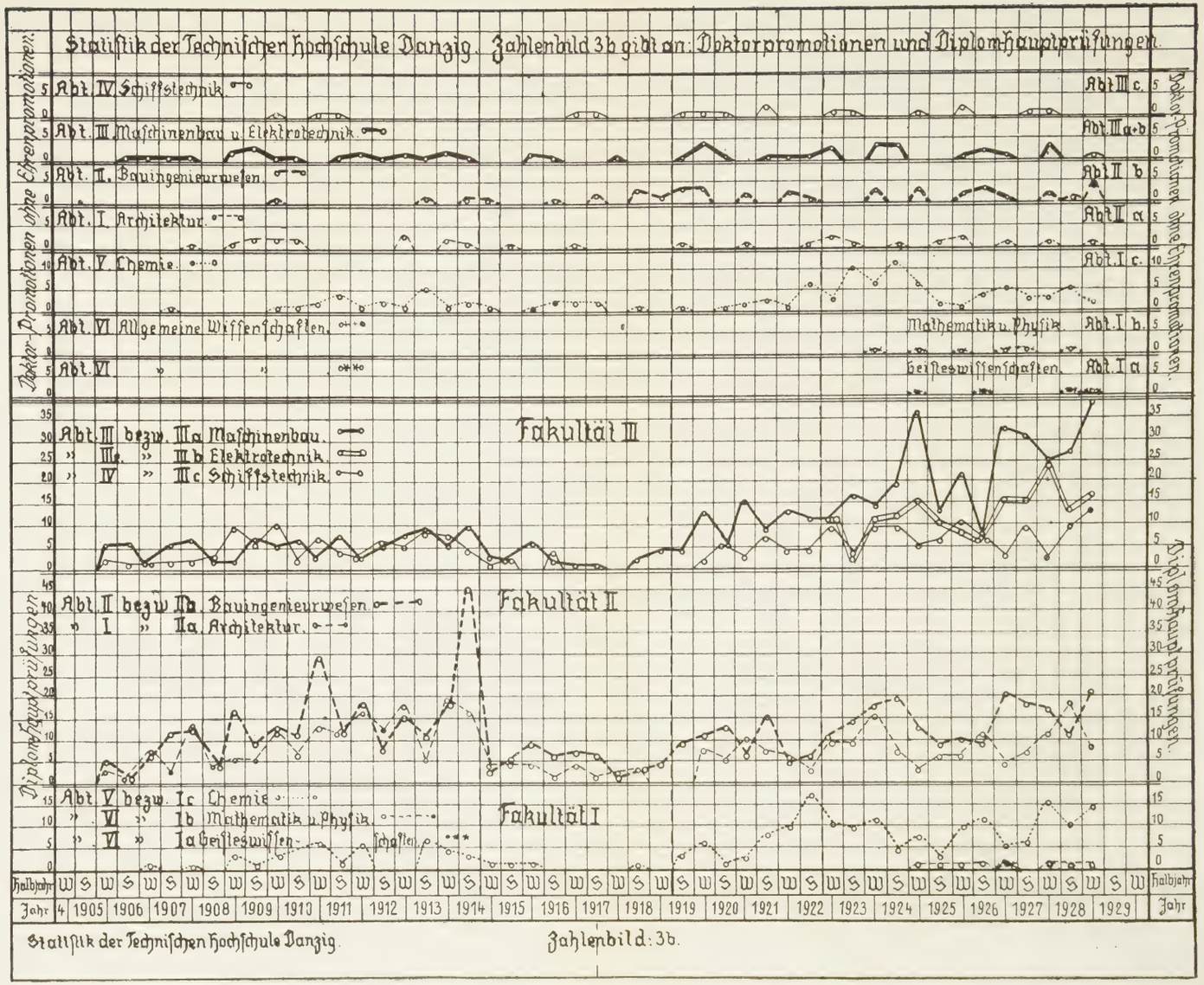
Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 3b.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild 3b.

		gibt an:	Diplom-Hauptprüfungen.								Doktor-Promotionen.							
	Alte Bezeichnung.		VI	VI	V	I	II	III	IIIc	IV	Summe	VI	VI	V	I	II	III	IV	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	W																	
	1905	S																	
	1905/06	W				3	5	6		2	16								
	1906	S				1	1	6		1	9						1		1
	1906/07	W			1	8	7	2		2	20						1		1
	1907	S				3	12	6		2	23				1		1		2
	1907/08	W			1	14	13	7		2	37					1	1		2
	1908	S				4	4	2		3	13								
	1908/09	W			3	5	17	2		9	36				1		2		3
	1909	S			1	5	9	7		6	28				2		3		5
	1909/10	W			3	12	13	3		10	43			1	2	1	1	1	6
	1910	S				6	12	7		2	27			1	2		1		4
	1910/11	W			6	13	29	3		7	58			2				1	3
	1911	S			1	12	12	8		4	37			4			1	1	6
	1911/12	W			5	16	38	3		3	45			1			2		3
	1912	S				13	8	5		6	32			2			1		3
	1912/13	W				18	15	8		5	46			1	3		2		6
	1913	S			7	5	11	9		8	40			5		1	1		7
	1913/14	W			4	19	18	5		7	53			1	2		2		5
	1914	S			3	16	45	9		4	77			2	1	1	1		5
Kriegszeit.	1914/15	W			1	4	3	3		1	12			1		1			2
	1915	S			1	4	5	2		2	14				1				1
	1915/16	W			1	4	9	6			20			1			2		3
	1916	S				1	6	2		4	13			2		1	1		4
	1916/17	W				4	7	1			12			2	1			1	4
	1917	S				1	6	1			8			2		2		1	5
	1917/18	W				2	1				3						1		1
	1918	S			1	3	3	2			9			1		3			4
	1918/19	W					4	4			8					1			1
Übergangszeit.	1919	S			3		9	4			16			1	1	3	1	1	7
	1919/20	W			6	8	11	13		2	40					3	4	1	8
	1920	S			1	5	13	5		5	29			1			1	1	3
	1920/21	W			3	10	6	15		3	37			2	1	2			5
	1921	S			8	8	15	9		7	47			3			1	2	6
	1921/22	W			9	6	4	13		4	36			1		2	1		4
	1922	S			11	3	6	11		4	41			6	1	1	1		9
Nachkriegszeit.	1922/23	W			10	9	10	11	11	9	60			3	2		3	1	9
	1923	S			9	9	14	16	3	4	55			10	1			1	12
	1923/24	W			11	15	22	14	11	9	82		1	6		3	4		14
	1924	S			4	7	24	19	12	9	75			11	1		4		16
	1924/25	W		1	7	3	13	36	15	5	80	1	1	6		3		1	12
	1925	S		1	3	6	9	13	10	6	48			2	1				3
	1925/26	W		1	9	6	10	21	8	10	65		1	1	2	2	1	2	9
	1926	S		1	11	11	9	8	6	6	52	1		4			3	2	10
	1926/27	W	1		5	4	29	33	15	3	90		1	5	1	1	1		9
	1927	S			6	7	18	31	15	9	86		1	3				1	5
	1927/28	W		1	15	11	17	25	24	3	96			3	1	2	3	1	10
	1928	S		1	10	18	11	27	13	9	89	1	1	5		1			8
	1928/29	W		1	14	8	21	39	17	13	113	1		2	1	4	1		9
	Summe		1	7	200	350	564	484	160	210	1976	4	6	105	29	38	54	19	225
	Neue Bezeichnung.		Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	Summe	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa+b	IIIc	Summe

2.k.XI.1928 — Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. — E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 3b.



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 3b.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 4. gibt an: Zusammensetzung des Lehrkörpers.

		1.	1a	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	1+2+3+4+5+6	7+8	9+10	Summe
Vorkriegszeit.	1904/05	28				1			12		4		29	12	4	45
	1905/06	27				1			12		4	2	28	12	6	46
	1906/07	27				1			11	1	4	3	28	12	7	47
	1907/08	27				1			12	1	4	2	28	13	6	47
	1908/09	27				1			13	2	4	1	28	15	5	48
	1909/10	29				1			14	5	4	1	30	19	5	54
	1910/11	30				1			16	7	4	1	31	23	5	59
	1911/12	31				1			15	10	4	1	32	25	5	62
	1912/13	31				1			16	12	4	1	32	28	5	65
	1913/14	30				1			15	11	4	1	31	26	5	62
Kriegszeit.	1914/15	31				1			14	10	4	1	32	24	5	61
	1915/16	31				1			14	10	4	1	32	24	5	61
	1916/17	32				1			15	9	4	1	33	24	5	62
	1917/18	32				1			15	8	4	1	33	23	5	61
	1918/19	32				1			16	8	4	1	33	24	5	62
Übergangszeit.	1919/20	32				1			15	8	4	1	33	23	5	61
	1920/21	33				1	2		15	7	4	1	36	22	5	63
	1921/22	33				1	1		15	7	4	1	35	22	5	62
Nachkriegszeit.	1922/23	33			8	1	2		6	6	4	1	44	12	5	61
	1923/24	34			8	1	3		3	7	4	1	46	10	5	61
	1924/25	33			8	1	3	1	1	7	4	1	46	8	5	59
	1925/26	36		2	7	1	1	1	1	10	4	2	48	11	6	65
	1926/27	34	2	2	7	1	1	2	1	10	4	2	$47\frac{2}{2}$	11	6	$64\frac{2}{2}$
	1927/28	35	3	3	6	1	1	3	3	10	4	2	$49\frac{3}{3}$	13	6	$68\frac{3}{3}$
	1928/29	35	2	3	6	2	1	6	2	12	2	4	$53\frac{3}{2}$	14	6	$73\frac{3}{2}$
	Studienjahr	783	7	10	50	26	15	13	272	178	98	34				

Erklärung der Zeichen.

1. planmäßige ordentliche Professuren.
1a. emeritierte Professoren.
2. planmäßige außerordentliche Professuren (persönliche ordentliche Professoren.)
3. außerordentliche Professuren.
4. ordentliche Honorarprofessoren.
5. außerordentliche Honorarprofessoren.
6. außerplanmäßige außerordentliche Professoren.
7. Dozenten.
8. Privatdozenten.
9. Lektoren.
10. mit der Abhaltung von Vorlesungen Beauftragte.

27.11.28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 4

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 4 gibt an: Zusammensetzung des Lehrkörpers.

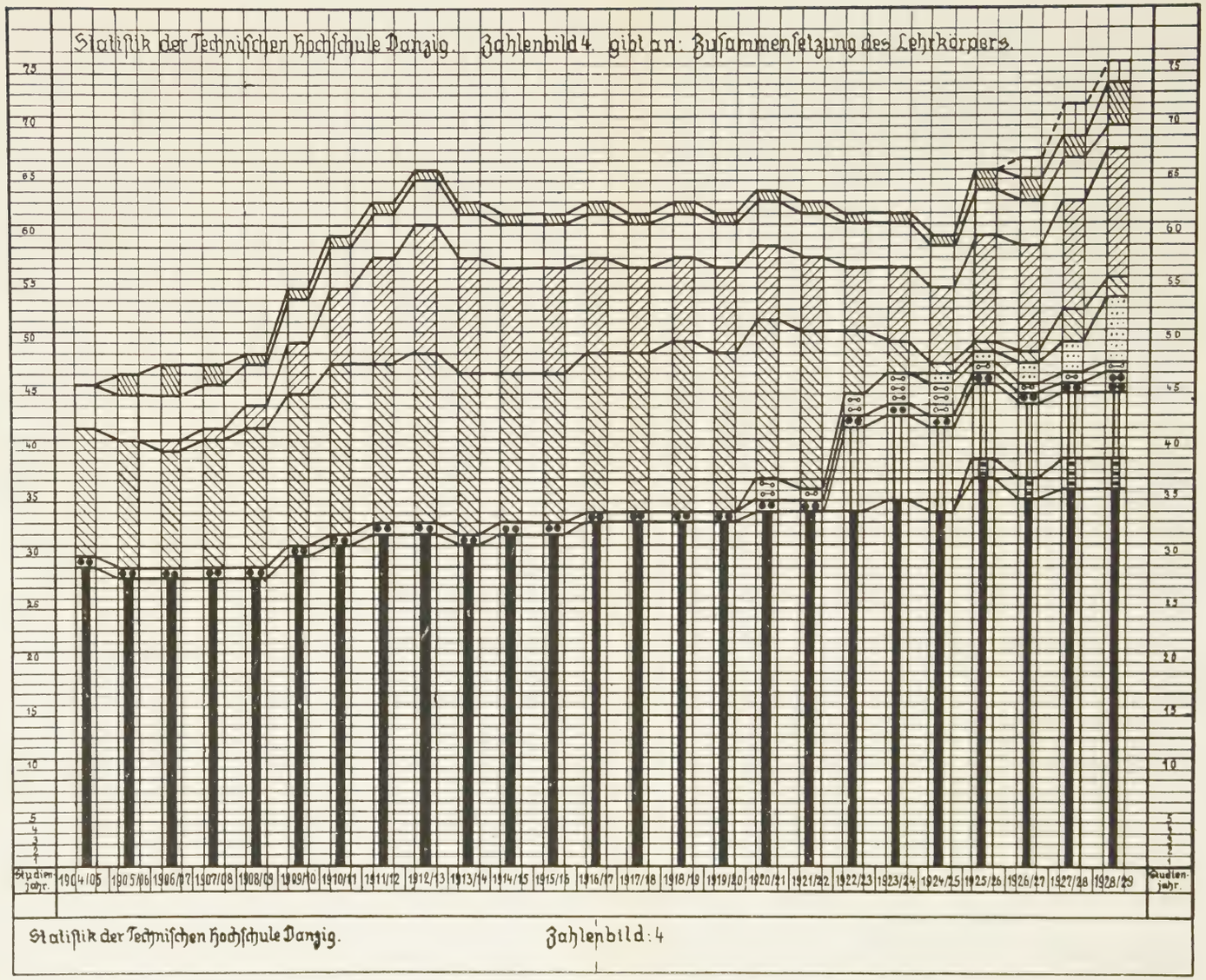
		1.	1a	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	1+2+3+4+5+6	7+8	9+10	Summe
Vorkriegszeit	1904/05	28				1			12		4		29	12	4	45
	1905/06	27				1			12		4	2	28	12	6	46
	1906/07	27				1			11	1	4	3	28	12	7	47
	1907/08	27				1			12	1	4	2	28	13	6	47
	1908/09	27				1			13	2	4	1	28	15	5	48
	1909/10	29				1			14	5	4	1	30	19	5	54
	1910/11	30				1			16	7	4	1	31	23	5	59
	1911/12	31				1			15	10	4	1	32	25	5	62
	1912/13	31				1			16	12	4	1	32	28	5	65
	1913/14	30				1			15	11	4	1	31	26	5	62
Kriegszeit	1914/15	31				1			14	10	4	1	32	24	5	61
	1915/16	31				1			14	10	4	1	32	24	5	61
	1916/17	32				1			15	9	4	1	33	24	5	62
	1917/18	32				1			15	8	4	1	33	23	5	61
	1918/19	32				1			16	8	4	1	33	24	5	62
Übergangs Zeit	1919/20	32				1			15	8	4	1	33	23	5	61
	1920/21	33				1	2		15	7	4	1	36	22	5	63
	1921/22	33				1	1		15	7	4	1	35	22	5	62
Nachkriegszeit	1922/23	33			8	1	2		6	6	4	1	44	12	5	61
	1923/24	34			8	1	3		3	7	4	1	46	10	5	61
	1924/25	33			8	1	3	1	1	7	4	1	46	8	5	59
	1925/26	36		2	7	1	1	1	1	10	4	2	48	11	6	65
	1926/27	34	2	2	7	1	1	2	1	10	4	2	47	11	6	64
	1927/28	35	3	3	6	1	1	3	3	10	4	2	48	13	6	68
	1928/29	35	2	3	6	2	1	6	2	12	2	4	53	14	6	73
	Studienjahr	183	7	10	50	26	15	13	272	178	98	34				

Erklärung der Zeichen.

1. planmäßige ordentliche Professuren.
1a. emeritierte Professoren.
2. planmäßige außerordentliche Professuren (persönliche ordentliche Professoren.)
3. außerordentliche Professuren.
4. ordentliche Honorarprofessoren.
5. außerordentliche Honorarprofessoren.
6. außerplanmäßige außerordentliche Professoren.
7. Dozenten.
8. Privatdozenten.
9. Lektoren.
10. mit der Abhaltung von Vorlesungen Beauftragte.

27.11.28 Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 4



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 4

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild. 4a.

gibt an: Anzahl der Assistentenstellen.

	Studienjahr	Anzahl.
Alte Einteilung.	1904/05	40
	1905/06	29
	1906/07	34
	1907/08	35
	1908/09	39
	1909/10	43
	1910/11	41
	1911/12	48
	1912/13	48
	1913/14	51
	1914/15	50
	1915/16	50
	1916/17	48
	1917/18	46
	1918/19	49
	1919/20	50
	1920/21	50
	1921/22	50
	1922/23	54
Neue Einteilung.	1923/24	61
	1924/25	65
	1925/26	64
	1926/27	63
	1927/28	65
	1928/29	77

27.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

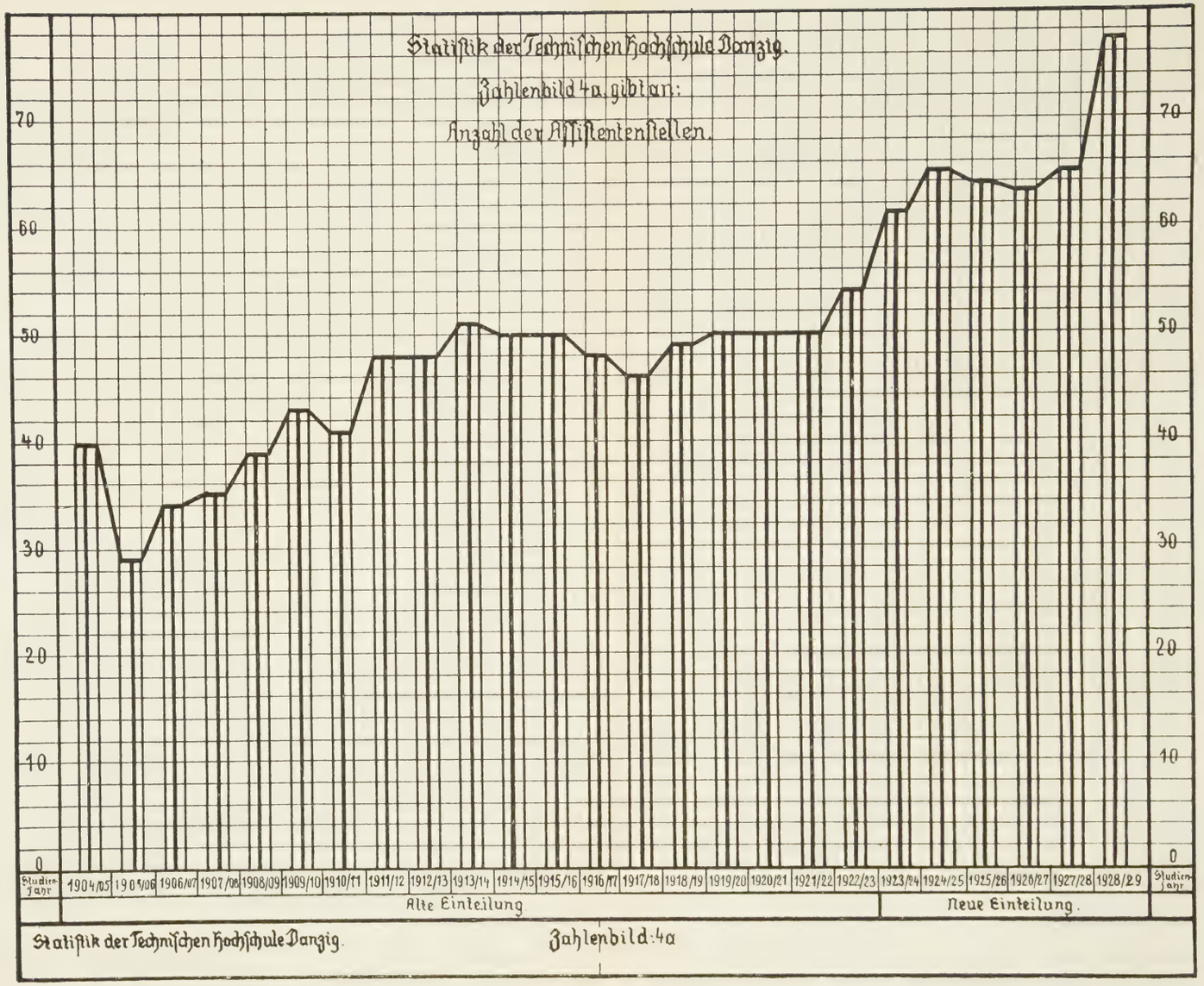
Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 4a

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.
Zahlenbild. 4a.
gibt an: Anzahl der Assistentenstellen.

	Studienjahr	Anzahl.
Alte Einteilung.	1904/05	40
	1905/06	29
	1906/07	34
	1907/08	35
	1908/09	39
	1909/10	43
	1910/11	41
	1911/12	48
	1912/13	48
	1913/14	51
	1914/15	50
	1915/16	50
	1916/17	48
	1917/18	46
	1918/19	49
	1919/20	50
	1920/21	50
	1921/22	50
	1922/23	54
Neue Einteilung.	1923/24	61
	1924/25	65
	1925/26	64
	1926/27	63
	1927/28	65
	1928/29	77

27.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 4a



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 4a

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 4b gibt an: Anzahl der Vorlesungen und Übungen.

	Studienjahr	VI		V	I	II	III		IV	Summe.
Alte Einteilung.	1904/05	43		19	29	21	23		21	156
	1905/06	55		25	30	23	29		20	182
	1906/07	56		27	33	25	33		19	193
	1907/08	62		25	35	26	32		21	201
	1908/09	63		27	37	26	41		23	217
	1909/10	64		27	38	26	43		31	229
	1910/11	70		27	38	29	45		31	240
	1911/12	75		38	38	34	46		32	263
	1912/13	71		41	38	31	46		35	262
	1913/14	74		38	40	31	46		38	267
	1914/15	71		40	39	34	47		39	270
	1915/16	71		40	39	38	47		39	274
	1916/17	70		40	39	39	48		36	272
	1917/18	67		37	39	39	56		36	274
	1918/19	68		25	39	39	48		36	255
	1919/20	77		26	39	38	49		36	265
	1920/21	83		25	40	39	50		35	272
	1921/22	90		29	41	43	57		36	296
	1922/23	86		26	41	41	63		36	293
Neue Einteilung.	1923/24	43	41	42	39	43	51	20	37	316
	1924/25	56	43	39	38	43	59	20	39	337
	1925/26	63	47	55	37	42	58	19	39	360
	1926/27	63	50	64	40	41	63	23	48	392
	1927/28	70	53	70	39	43	65	24	45	409
	1928/29	85	47	80	40	50	62	23	48	435
		Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	

Zeichenerklärung.

	Abt.	Alte Einteilung.	Abt.	Neue Einteilung.
	VI	Allgemeine Wissenschaften.	Ia	Geisteswissenschaften.
			Ib	Mathematik und Physik.
	V	Chemie.	Ic	Chemie einschl. Landwirtschaft.
	I	Architektur.	IIa	Architektur.
	I	Bauingenieurwesen.	IIb	Bauingenieurwesen.
	III	Maschineningenieurwesen.	IIIa	Maschinenbau.
			IIIb	Elektrotechnik.
	IV	Schiff- u. Schiffsmaschinenbau.	IIIc	Schiffstechnik und Flugtechnik.

26.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel 4b

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 4b gibt an: Anzahl der Vorlesungen und Übungen.

	Studienjahr	VI	V	I	II	III	IV	Summe.
Alte Einteilung.	1904/05	43	19	29	21	23	21	156
	1905/06	55	25	30	23	29	20	182
	1906/07	56	27	33	25	33	19	193
	1907/08	62	25	35	26	32	21	201
	1908/09	63	27	37	26	41	23	217
	1909/10	64	27	38	26	43	31	229
	1910/11	70	27	38	29	45	31	240
	1911/12	75	38	38	34	46	32	263
	1912/13	71	41	38	31	46	35	262
	1913/14	74	38	40	31	46	38	267
	1914/15	71	40	39	34	47	39	270
	1915/16	71	40	39	38	47	39	274
	1916/17	70	40	39	39	48	36	272
	1917/18	67	37	39	39	56	36	274
	1918/19	68	25	39	39	48	36	255
	1919/20	77	26	39	38	49	36	265
	1920/21	83	25	40	39	50	35	272
	1921/22	90	29	41	43	57	36	296
	1922/23	86	26	41	41	63	36	293

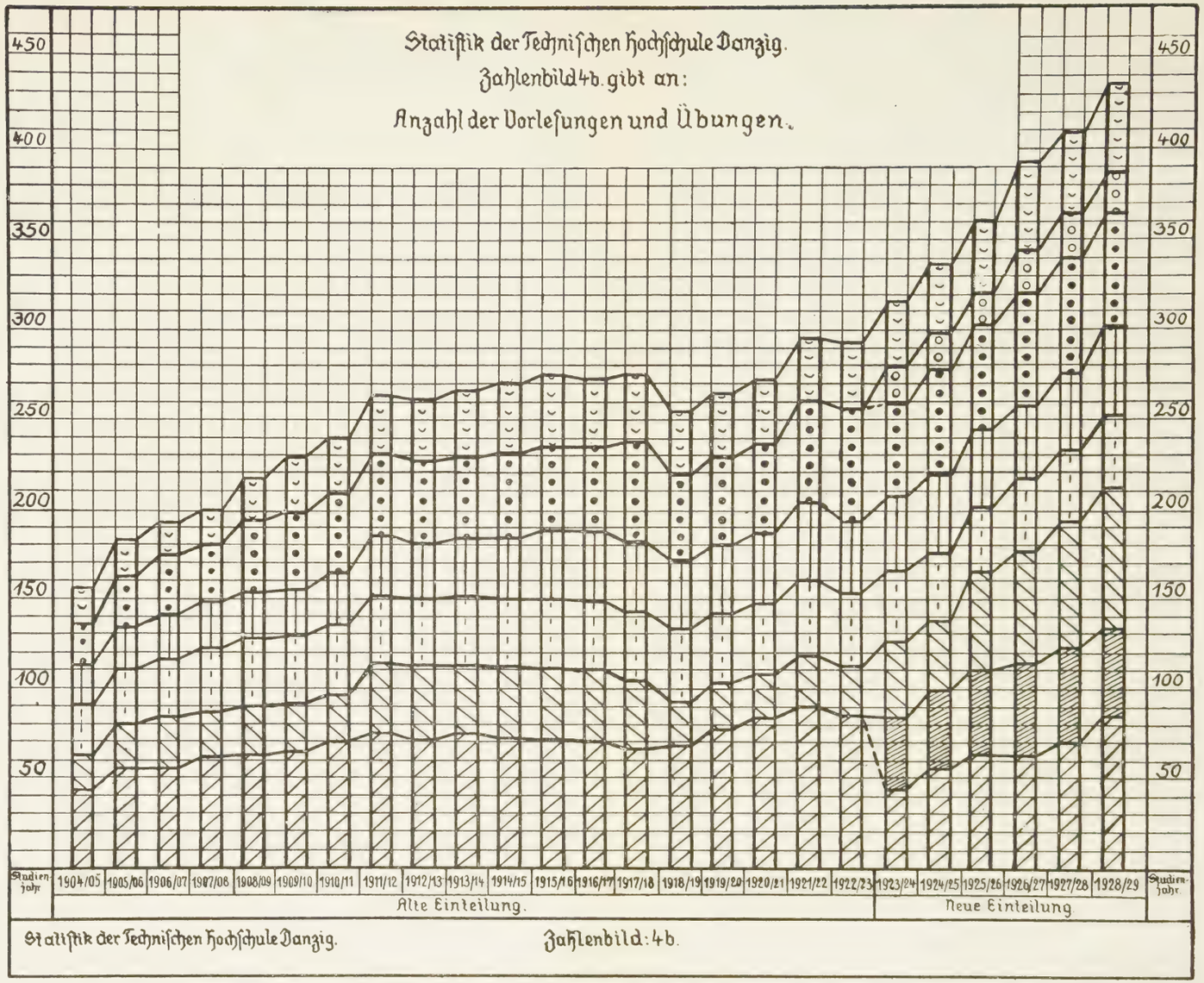
	Studienjahr	Ia	Ib	Ic	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	Summe.
Neue Einteilung.	1923/24	43	41	42	39	43	51	20	37	316
	1924/25	56	43	39	38	43	59	20	39	337
	1925/26	63	47	55	37	42	58	19	39	360
	1926/27	63	50	64	40	41	63	23	48	392
	1927/28	70	53	70	39	43	65	24	45	409
	1928/29	85	47	80	40	50	62	23	48	435

Zeichenerklärung

	Abt.	Alte Einteilung.	Abt.	Neue Einteilung.
	VI	Allgemeine Wissenschaften.	Ia	Geisteswissenschaften.
			Ib	Mathematik und Physik.
	V	Chemie.	Ic	Chemie einschl. Landwirtschaft.
	I	Architektur	IIa	Architektur.
	I	Bauingenieurwesen.	IIb	Bauingenieurwesen.
	III	Maschineningenieurwesen.	IIIa	Maschinenbau.
			IIIb	Elektrotechnik
	IV	Schiff-u. Schiffsmaschinenbau.	IIIc	Schiffstechnik und Flugtechnik.

26.3.29. Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 4b



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 4b.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

Zahlenbild 5. gibtan:

	Rechnungsjahr		Einnahmen. a.	Betriebszuschuß. b.	Ausgaben. c = a+b.
Vorkriegszeit.	1904	ℳ	25 000	286 000	311 000
	1905	ℳ	78 000	454 000	532 000
	1906	ℳ	102 000	433 000	535 000
	1907	ℳ	104 000	469 000	573 000
	1908	ℳ	120 000	493 000	613 000
	1909	ℳ	131 000	624 000	755 000
	1910	ℳ	121 000	605 000	726 000
	1911	ℳ	121 000	617 000	738 000
	1912	ℳ	126 000	617 000	743 000
	1913	ℳ	135 000	657 000	792 000
Kriegszeit.	1914	ℳ	81 000	642 000	723 000
	1915	ℳ	22 000	577 000	599 000
	1916	ℳ	68 000	540 000	608 000
	1917	ℳ	44 000	574 000	618 000
	1918	ℳ	96 000	952 000	1 048 000
Übergangszeit.	1919	ℳ	219 000	1 986 000	2 205 000
	1920	ℳ	507 000	4 801 000	5 308 000
	1921	ℳ	843 000	7 734 000	8 577 000
	1922	ℳ	21 542 000	314 353 000	335 895 000
	1923	ℳ	24653 805 000	36347564 874 000	36372218 479 000
Nachkriegszeit.	1923	G	195 000	439 000	634 000
	1924	G	652 000	1 566 000	2 218 000
	1925	G	654 000	2 099 000	2 753 000
	1926	G	806 000	1 494 000	2 300 000
	1927	G	819 000	1 480 000	2 299 000
	1928	G	+) 926 000	+) 1 513 000	+) 2 439 000
	1929	G	o) 926 000	1 674 000	o) 2 600 000

o) Entwurf. +) Haushalt!

28.11.28. · Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 5

Statistik der Technischen Hochschule Danzig.

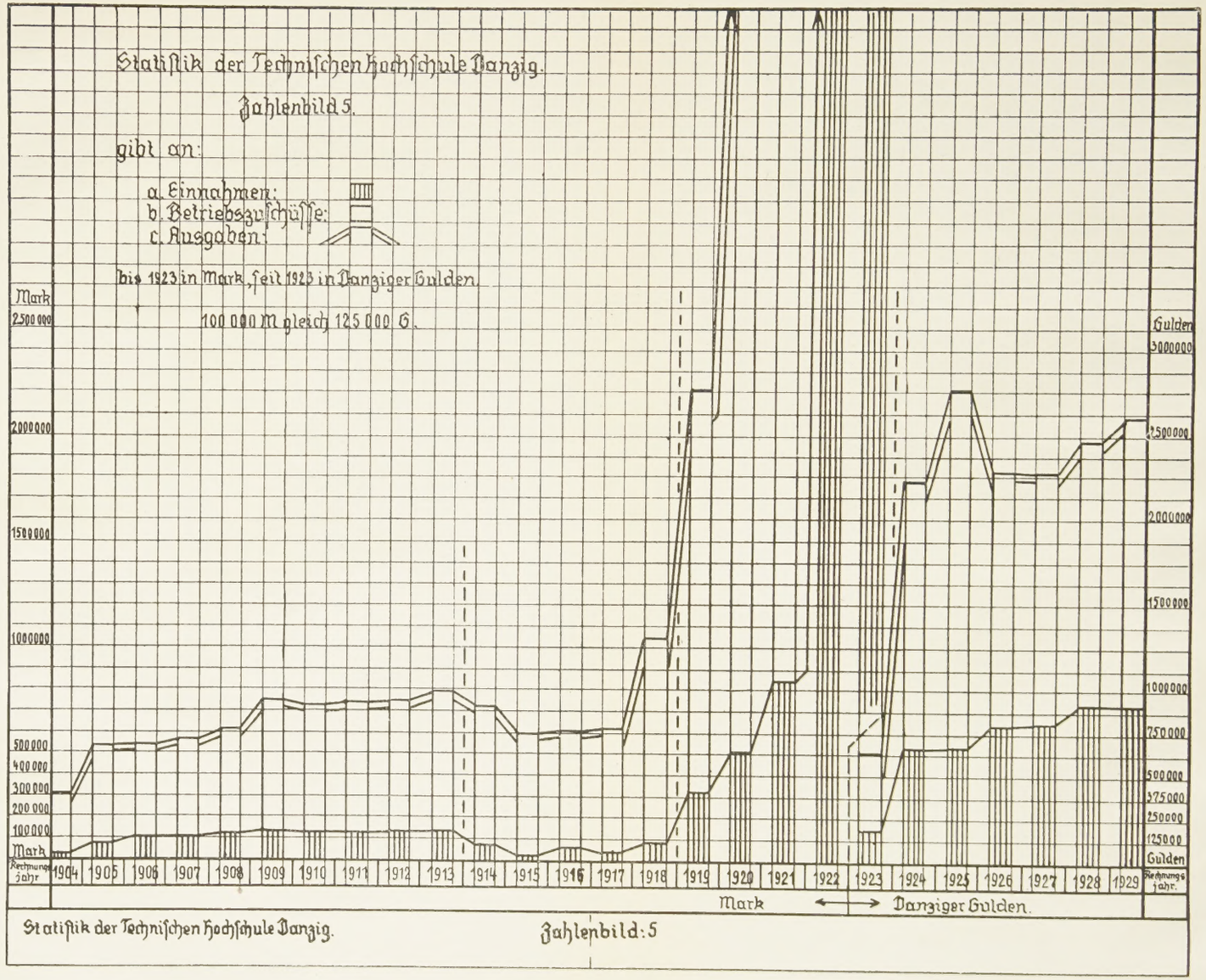
Zahlenbild 5. gibt an:

	Rechnungsjahr		Einnahmen. a.	Betriebszuschuß. b.	Ausgaben. c = a+b.
Vorkriegszeit.	1904	M	25 000	286 000	311 000
	1905	M	78 000	454 000	532 000
	1906	M	102 000	433 000	535 000
	1907	M	104 000	469 000	573 000
	1908	M	120 000	493 000	613 000
	1909	M	131 000	624 000	755 000
	1910	M	121 000	605 000	726 000
	1911	M	121 000	617 000	738 000
	1912	M	126 000	617 000	743 000
	1913	M	135 000	657 000	792 000
Kriegszeit.	1914	M	81 000	642 000	723 000
	1915	M	22 000	577 000	599 000
	1916	M	68 000	540 000	608 000
	1917	M	44 000	574 000	618 000
	1918	M	96 000	952 000	1 048 000
Übergangszeit.	1919	M	219 000	1 986 000	2 205 000
	1920	M	507 000	4 801 000	5 308 000
	1921	M	843 000	7 734 000	8 577 000
	1922	M	21 542 000	314 353 000	335 895 000
	1923	M	24 653 805 000	36 347 564 874 000	36 372 218 479 000
Nachkriegszeit.	1923	G	195 000	439 000	634 000
	1924	G	652 000	1 566 000	2 218 000
	1925	G	654 000	2 099 000	2 753 000
	1926	G	806 000	1 494 000	2 300 000
	1927	G	819 000	1 480 000	2 299 000
	1928	G	*) 926 000	*) 1 513 000	*) 2 439 000
	1929	G	*) 926 000	1 674 000	*) 2 600 000

*) Entwurf. +) Haushalt!

28.11.28. * Nach amtlichen Angaben der Hochschulverwaltung. E.P.

Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlentafel: 5



Statistik der Technischen Hochschule Danzig. Zahlenbild: 5

UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 072887950